

[建筑光伏]

分布式光伏发电系统的应用

文/廖文宗
深圳市华阳国际工程设计股份有限公司

结合具体项目案例阐述了不同类型太阳能系统的选择逻辑和适用场景，重点介绍建筑光伏发电系统的两种形式和项目年总用电量的两种计算方法，阐述光伏组件安装容量的计算方法、光伏组件的选择、逆变器的选择、光伏组件串的设计逻辑和方法等，介绍三种并网方式的区别，光伏系统孤岛保护的设计及监控系统设计。

随着全球气候变暖，人们越发地意识到控制温室气体排放量的重要性。2020年9月中国政府在第七十五届联合国大会上正式提出在2030年前实现碳达峰，努力争取在2060年前实现碳中和的宏伟目标。与此同时，住房和城乡建设部也发布了GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》，规范中明确要求新建建筑均应安装太阳能系统，于是分布式光伏发电系统迎来了新的发展契机。目前在民用建筑领域分布式光伏发电系统更多的是由光伏厂家设计，民用建筑设计院在此方面稍微缺乏经验。本文以具体项目为例，总结光伏系统关键设计环节，提供大概的设计思路。

项目简介

本项目位于深圳市，总建筑面积约26.3万m²，建筑面积约20.5万m²，地下建筑面积约5.8万m²。项目包含一栋12.5万m²的超高层办公楼，一栋4万m²的超高层宿舍，三层1.5万m²的商业裙房以及0.5万m²的配套用房。

光伏电站的设计要点

1. 太阳能系统形式选择

太阳能系统包括太阳能热利用系统、太阳能光伏发电系统及太阳能光伏光热系统。太阳能热利用系统按照系统功能不同又可分为太阳能热水系统、

太阳能供暖系统和太阳能空调系统，目前在民用建筑领域应用较多的是太阳能热水系统。太阳能光伏光热系统目前技术还不是很成熟，在民用建筑还不常见。由于GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》中关于可再生能源利用的章节仅仅规定了新建工业与民用建筑都应安装太阳能系统，并没有规定具体的形式。因此本项目方案初期，对太阳能热水系统和太阳能光伏发电系统两种形式从项目需求、负荷曲线和经济效益三个方面做了简单比较。太阳能热水系统适用于对热水有稳定需求的项目，比如住宅、公寓、保障房等居住类建筑以及酒店、宾馆、度假村和医院住院楼等含有居住功能的公共建筑。太阳能光伏系统的能量转换形式决定了它的适用的范围更广，太阳能先转化为电能，而电能又可以转化为各种能源，可以制冷也可以制热，可以驱动各类动力设备也可以带各类照明设备，因此各类项目都适用。本项目的主要功能为商业和办公，商业和办公的负荷曲线与光伏的输出功率曲线较接近，且商办的电价较高，实现自发自用容易取得较好的经济收益。本项目经建设方评审最终确定采用太阳能光伏发电系统。

2. 光伏发电系统形式的选择

安装在工业与民用建筑上的光伏系统简称为“建筑光伏系统（BMPV）”，根据光伏组件是否作为建筑整体的一部分又可分为构建型建筑光伏系

统 (BIPV) 和安装型建筑光伏系统 (BAPV)。例如, 利用光伏组件作为建筑物幕墙、穹顶的就属于构建型建筑光伏系统, 光伏组件在建筑屋面上安装的就属于安装型光伏系统。由于构建型光伏系统的光伏组件作为建筑材料的一部分, 需要具备防水、防火、隔热和抗风等重要属性, 目前市场上的产品良莠不齐, 选择时需谨慎。因为构建型光伏系统中的光伏组件可以很好地与建筑融为一体, 因此对建筑外观有较高需求时建议采用构建型光伏系统。安装型建筑光伏系统发展由来已久, 技术条件比较成熟, 适用于一些对外观没有特别高要求的建筑, 尤其是平顶混凝土屋面的建筑。本项目屋顶为平屋面, 建设方最终选择安装型光伏发电系统。

3. 光伏发电系统并网电量的确定

由于GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》中关于可再生能源利用的章节仅规定了新建建筑应安装太阳能系统, 具体的安装容量没有明确的要求。根据GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》中可再生能源利用评分规则一表可知, 当光伏发电系统并网电量占项目总用电量的比例 (R_c) $\geq 0.5\%$ 时即可得2分, 比例越高得分也相应越高。因此要确定光伏发电系统并网电量, 需先计算项目年总用电量, 以下总结两种估算项目年总用电量的方法。

(1) 方法一

引用《工业与民用供配电设计手册 (第四版)》(简称《配四》) 第一章中负荷计算的相关公式计算。先采用负荷密度指标法计算项目各类功能空间的计算有功功率, 如式 (1); 再利用年最大负荷利用小时数计算各类功能空间的年电能消耗量, 如式 (2); 最后将各类功能空间的年电能消耗量求和, 得到整个项目的年电能消耗量。

$$P_c = \frac{P_a A}{1000} \quad (1)$$

$$W_y = P_c T_{\max} \quad (2)$$

式中, W_y 为年有功电能消耗量 ($\text{kW}\cdot\text{h}$); P_a 为负荷密度 (W/m^2); P_c 为计算有功功率 (kW); A 为建筑面积 (m^2); $T_{\max}$ 为年最大有功负荷利用小时数。

(2) 方法二

GB/T 51161—2016《民用建筑能耗标准》(简称《能耗标准》) 是以大量的实际建筑能耗数据模型为基础编制的贴合我国目前国情的民用建筑

能耗指标标准, 因此采用《能耗标准》中的指标可以很快地计算出建筑各类功能空间的年电能消耗量。《能耗标准》指出, 只有在集中供暖的严寒地区才有供暖能耗的概念, 在非集中供暖区域 (即非严寒寒冷地区), 建筑能耗可以划分为居住建筑非供暖能耗和公共建筑非供暖能耗。深圳属于夏热冬暖地区, 故只需要统计居住建筑非供暖能耗指标和公共建筑非供暖能耗指标即可。

居住建筑非供暖能耗指标按户数计算, 每户的指标从《能耗标准》中表4.3.1查询可得, 当户内居住人数大于3人时, 每户的指标还需要通过《能耗标准》中4.3.1式校正确定。

公共建筑非供暖能耗指标按面积计算, 办公、旅馆、商业和机动车库等不同功能空间的能耗指标分别可从《能耗标准》中表5.2.1~表5.2.4查得。当各类功能空间的实际使用时间以及人员密度与《能耗标准》设定的设计指标有差别时, 能耗指标也相应需要进一步按照5.3.2章节进行校正。

由于方法一中《配四》给出的负荷密度指标范围跨度较大, 不容易估算项目的年耗电量, 而《能耗标准》是以大量的实际建筑能耗数据为基础制定的符合我国当前国情的建筑能耗指标标准, 因此估算误差相对较小, 故本项目最终采用方法二进行估算。经计算, 本项目最少年耗电量约为1 536.5万 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 根据绿建得分需求 R_c 取值0.5%, 故光伏发电系统上网电量至少为76 825 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

4. 光伏组件安装容量的确定

根据GB 50797—2012《光伏发电站设计规范》中6.6.2条规定, 光伏电站并网电量为

$$E_p = H_A \times \frac{P_{AZ}}{E_s} \times K \quad (3)$$

式中, E_p 为上网发电量 ($\text{kW}\cdot\text{h}$); H_A 为水平面太阳能总辐照量 ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$, 峰值小时数); E_s 为标准条件下的辐照度 (常数); P_{AZ} 为组件安装容量 (kWp); K 为综合效率系数, 包括光伏组件类型修正系数、光伏方阵的倾角、方位角修正系数光伏发电系统可用率、光照利用率、逆变器效率、集电线路损耗、升压变压器损耗、光伏组件表面污染修正系数和光伏组件转换效率修正系数。

项目并网电量 E_p 为76 825 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 查资料可知, 深圳地区 H_A 可取1 405 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ (5 057.11 MJ/m^2),

标准条件下的辐照度 E_s 取常数 $1\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ ，综合效率系数 K 取0.8，可求得本项目需要安装的光伏组件总容量不少于68.3 kWp。

5. 并网电压的选择

一般情况下安装容量 $\leq 1\text{ MWp}$ 的光伏发电系统采用380 V低压并网，安装容量为 $1\sim 30\text{ MWp}$ 的光伏发电系统通常采用10 kV或者35 kV并网，安装容量大于30 MWp的光伏发电系统应采用66 kV并网。380 V低压并网的方式可快速与低压母排或者某个配电总箱接入，使用的设备少，具有安全、成本低、方便快捷的优点。本项目安装容量远远小于1 MWp，采用380 V低压并网。

6. 光伏组件的选择

目前市场上常见的光伏组件有三类，分别为单晶硅组件、多晶硅组件和薄膜组件，三种不同组件的特点比较见表1。

表1 单晶硅组件、多晶硅组件、薄膜组件特点比较

组件类型	市场占有率	平均光电转换效率(%)	使用寿命/年	制造成本	外观	适用范围
单晶硅组件	中	20	25~30	一般	深色、黑色	BAPV
多晶硅组件	高	18.4	25	较低	蓝色、深蓝色	BAPV
薄膜组件	低	13%~16	25	较高	多种颜色	BIPV

多晶硅组件具有使用寿命长、成本低的优点，本项目最终采用多晶硅组件。组件的主要参数参考国内某主流厂家产品，见表2。

表2 多晶硅组件主要参考参数

指标	规格参数	指标	规格参数
最大功率/W	300	电池片类型	单晶硅 156×156
开路电压/V	39.58	尺寸/mm	1658×992×6
最大工作电压/V	32.89	重量/kg	24
最大工作电流/A	9.13	导线/mm ²	4.0
短路电流/A	9.68	最大系统电压/V	DC1000
电池及组件转换效率(%)	18.2	工作温度/℃	-40~85
最大系统电压/V	DC100	V_{oc} 温度系数	-0.3%/℃

本项目需要安装的光伏组件总容量不少于68.3 kWp，每个组件的标称容量为300 Wp，故本项目需要安装的光伏组件数量为228个。

7. 逆变器的选择

逆变器是把太阳能组件输出的直流电转变为符

合电网并网要求的交流电的设备，是光伏发电系统的能量转换核心设备。根据功率的不同可分为微型逆变器、组串式逆变器和集中式逆变器。组串式逆变器具有体积小、重量轻、施工与维护方便、易于排除故障及不需要专门的配电室等诸多优点，本项目最终选择组串式逆变器，见表3。

表3 微型逆变器、组串式逆变器、集中式逆变器比较

组件类型	使用场景	效率	成本	施工与维护	可靠性
微型逆变器	小容量系统	较高	较高	较难	较差
组串式逆变器	大、中、小容量系统	一般	一般	一般	一般
集中式逆变器	大容量系统	较低	较低	较易	较高

本项目最终采用2个36 kW的组串式逆变器，组串式逆变器的主要参数参考国内某主流厂家产品，见表4。

表4 组串式逆变器主要参考参数

指标	规格参数	指标	规格参数
额定输出功率/KW	36	额定电网电压/V	380
最大直流功率/kWp	40.8	输出频率/Hz	50
最大交流电流/A	60.8	待机功耗/夜间功耗/W	<1
最高转换效率(%)	98.85	输出电流总谐波畸变率(%)	<3 (额定功率时)
最大直流电压/V	DC 1 100	功率因数	(满功率) 0.8 超前0.8滞后
MPPT电压工作范围/V	DC 200~1 000	外形尺寸/mm	930×550×260
MPPT数量	4	重量/kg	64
最大输入路数	8	工作环境温度范围(℃)	-25~+60
每路MPPT最大直流输入电流/A	22	允许最高海拔高度/m	4 000 (>4 000 降额)
最低共组电压/V	200	防护类型/防护等级	IP65 (室外)

8. 光伏组件串的设计

光伏矩阵的设计关键在于光伏组件组串的设计，而组串的数量应根据光伏组件的输出电压以及逆变器的输入电压确定。组件串的设计应遵循以下三个主要原则：①组串的开路电压应低于逆变器的最大接入电压，否则逆变器会烧毁；②组串的工作电压在逆变器的MPPT电压范围之内，否则会影响项目的发电效率；③组串的工作电压要不小于输出交流电压的 $\sqrt{2}$ 倍，否则逆变器的Boost升压电路就

会开始工作，同时会发热进而影响转换效率。计算的过程需要计入光伏组件的开路电压温度系数以及工作电压温度系数的影响，详见GB 50797—2012《光伏发电站设计规范》中6.4.2条。

经计算，本项目为了满足开路电压，每一串的组件数不得超过25个；为了满足工作电压，每一串的组件数应不少于6个且不得超过28个；为了避免Boost升压电路工作提高效率，每一串的组件数应不少于15个；综上所述组件数应 ≥ 15 且 ≤ 25 。根据计算本项目需要安装的光伏组件数量为228个，最终设计10个组件串，每一串由23个组件组成，共采用

230个300 Wp多晶硅组件。

9. 并网方式的选择

分布式光伏系统根据发电与用电的方式不同可以分为三种，即全部自用、全额上网、自发自用余电上网。当选择自发自用余电上网时，自发自用部分电价由用户电价加国家补贴以及地方补贴组成，余电上网部分电价由当地脱硫煤电价加国家补贴以及地方补贴；当选择全额上网时，电网以当地光伏发电标杆上网电价收购系统所发的全部电量。经比选，本项目采用自发自用余电上网的方式最经济。如图1所示。

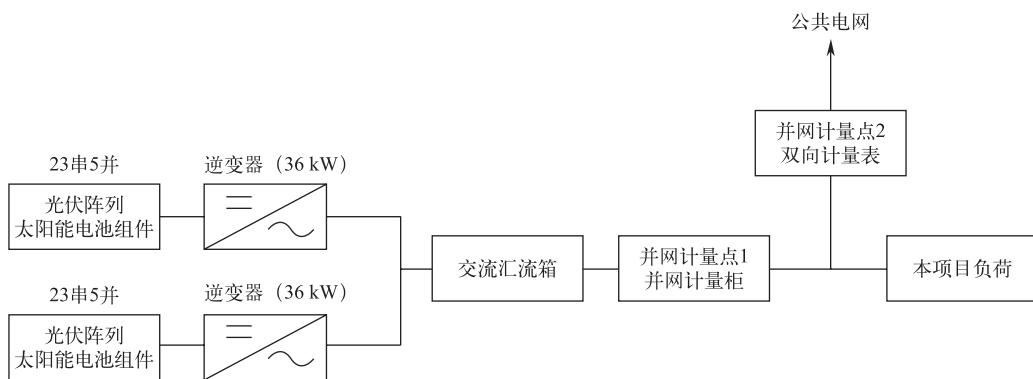


图1 光伏发电系统并网示意图

10. 孤岛保护装置

光伏发电系统中的孤岛现象是指当电网由于故障或者检修等各种原因处于停电或者失压状态的时候，光伏系统仍然向电网供电的现象。孤岛运行会带来诸多不利的影响，当电网需要断电检修的情况下，孤岛运行会使得电网任然带电，严重影响到检修人员的安全；当电网故障停电的时候，孤岛运行可能会使电网带电，但是电能的质量无法保障，导致用电设备的损坏或者逆变器的损坏。为避免孤岛运行，电网要求逆变器应具备孤岛保护功能。然而仅仅依靠逆变器自带的防孤岛保护功能还不够，当逆变器本身出现故障的时候孤岛保护功能也就失效，因此还需要增加专门的孤岛保护装置。目前孤岛保护装置大致可以分为两种，一种是防孤岛保护装置，另一种是反孤岛保护装置。防孤岛保护装置是一种微机保护装置，通过对电网电压、电流和频率等参数的测量、比较、分析，可有效地识别出孤岛现象，进一步使并网点开关分闸从而退出孤岛运行；反孤岛保护装置是安装在并网低压母线上设

备，相当于一种扰动负载，当出现孤岛运行的时候将反孤岛保护装置投入使用，从而打破孤岛运行的平衡，使得系统中的所有逆变器逼停，退出孤岛运行。经比较分析，本项目采用防孤岛保护装置。

11. 监控系统设计

根据GB 55015—2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》第5.2.5条第2款规定，光伏发电系统应对系统的发电量、光伏组件背板表面温度、室外环境的温度以及太阳总辐照量进行监测，因此需要设置光伏发电监测系统。除了以上参数监测以外，本项目还对光伏组件、逆变器、汇流箱和并网柜的状态进行监控。

结束语

除了以上关键步骤之外，还有开关、电缆的选型、光伏组件的安装角度、逆变器的安装、并网柜的安装及防雷设计等诸多事项，不再阐述。EA

(收稿日期：2024-03-15)