50 MW_p 并网光伏电站发电系统的设计研究

云南民族大学电气信息工程学院 ■ 苏颖 晋春杰 武平 郭巍 徐武 * 何晋

摘 要：根据宾川县西村光伏电站一期 50 MW_p 的实际情况，分析出并网光伏发电系统在宾川县具有可行性，通过对多种光伏组件的型式、组件安装及运行方式，以及逆变器的选型，设计出了比较合理的光伏阵列、电气部分 (即电气系统一次部分、二次部分、防雷措施的设计研究) 等。通过研究表明，并网光伏发电综合价值很高，在地理条件适宜、光照充足的地区可以建设并网光伏电站工程，可从根本上把本地的太阳能资源优势转变为经济优势。

关键词：光伏组件；并网光伏电站；电气系统

0 引言

随着全球经济的迅速发展，世界上各个国家对电力的需求量也在逐年增加，太阳能、风能、地热能等清洁、绿色能源受到了全世界广泛的认可与关注 [1]。在各种新能源快速发展的情况下，光伏发电拥有巨大的国际市场和广阔的发展前景。目前，光伏发电的核心技术已经慢慢进入成熟的轨道，其对国家经济的迅速发展起到了至关重要的作用，在全球能源高度紧张的情况下，这一技术也能很大程度上满足人们对新能源的需求。

以我国西南地区云南省为例，“十二五”期间，云南省大型并网光伏电站的建设容量达到 101.6 万 kW，代表云南省大型并网光伏电站的建设发展迈入了一个更高的台阶。宾川县位于云南大理白族自治州东部，是云南省太阳能资源最具开发价值的区域之一。该地年平均日照率高达 60%，大气中透明度也较高，太阳光照射在空气中的耗损十分少，其总辐射值基本保持在一定的范围内，年平均太阳总辐射为 6425.2 MJ/(m^2•a)，可持续输出太阳能。由此可以判定，宾川县具有非常丰富的太阳能资源，完全具备太阳能开发所需的必要条件。在宾川县进行并网光伏电站项目的规划建设，将大力推动云南省并网光伏电站建设的高速发展 [2]。

1 并网光伏发电系统的研究

1.1 光伏组件

光伏组件是并网光伏发电系统中最基本的结构单元。单个太阳电池片很少被用做电源，通常是将电池片串联或并联起来封装成不同功率的光伏组件。光伏组件作为系统中的基础核心部分，其质量好坏和成本高低在很大程度上代表了并网光伏发电系统的基本参数指标，质量可靠、性能稳定、封装良好的光伏组件能够在潮湿、恶劣和

收稿日期：2017-07-26
基金项目：国家自然科学基金项目：基于云南民族道地药材的模式识别相关技术研究 (61365007)
通信作者：徐武 (1974—)，男，教授、硕导，主要从事虚拟现实技术、电力系统分析方面的研究。xuwu_111@sina.com

2018.03印刷.indd 54 2018-3-23 16:33:03

太阳暴晒的自然环境下工作 20 年以上 [3]。

1.1.1 太阳电池种类及性质

目前常规使用的太阳电池主要有：晶体硅太阳电池、铜铟硒薄膜太阳电池、碲化镉薄膜太阳电池、非晶硅太阳电池等。它们之间的比较如表 1 所示。

表 1 常用的太阳电池对比

	晶体硅太阳电池	化合物（铜铟硒和碲化镉）薄膜太阳电池	非晶硅太阳电池
组件转换效率 /%	20	17	15
每 MW 占地面积 / 亩	＜ 30	＞ 40	约 35
综合成本	低	中	高
寿命	长	中	短
污染	无	有金属污染	无

由表 1 可知，晶体硅太阳电池与其他 2 种太阳电池相比，具有更长的运行寿命、相对较低的成本且无污染，用于大型光伏电站更为经济可靠。

1.1.2 光伏组件选型

光伏组件不仅需要有非常好的耐候性，还需在严酷的环境下能持久稳定地工作，同时保持理想的光电转换效率。

西村光伏电站位于宾川县大营镇西村以西，总规划装机容量为 150 MW_p，共分为三期建设。第一期并网光伏电站工程装机容量为 50 MW_p，已基本建设完毕。由于西村光伏电站规模较大，所以在光伏组件选型方面，应首先考虑光电转换效率较高且功率较大的光伏组件。一期 50 MW_p 并网发电系统采用的是 72 片的 280 W_p 多晶硅光伏组件，原因在于：1) 由于 72 片多晶硅光伏组件平均转换效率高于 60 片多晶硅光伏组件平均效率，且 72 片组件更加紧凑，所以使用 72 片的 280 W_p 多晶硅光伏组件能够减少土地占用面积，充分考虑了土地的裕度；2) 单个组件的功率越大，1 MW 方阵所需要的组件数量越少，连接组件的直流电缆也越少，一方面可降低投资，另一方面可降低直流损耗，提高系统发电效率。

1.2 逆变器选型

并网光伏发电系统研究中的核心之一就是逆变器的研究与设计，并网逆变器在系统转换效率和可靠性中占有非常重要的地位。为了提高系统的发电效率，同时也要使发电成本降到最低，需要对逆变器的内部结构及其控制方法进行研究，逆变器最基本的作用就是可以将电池输出的直流电转换为交流电 [4]。2 种并网逆变器的参数比较如表 2 所示。

由表 2 可知，根据并网逆变器目前的技术水平及价格因素，考虑到可靠性、实用性、灵活性等要求，本工程应选择集中式逆变器。组串式逆变器容量小，不适合用于大型光伏电站，目前世界上大型并网光伏工程一般都采用集中式逆变

表 2 并网逆变器的参数比较

逆变器参数	集中式逆变器	组串式逆变器
额定输出功率 / kW	100～500	10～50
1 路 MPPT/ 串	约 100	1～2
防护等级	室内 IP20，室外 IP54	IP65
冷却方式	强制风冷	自然散热
系统组成	逐级汇流，必须有熔丝、风扇	无熔丝设计、无外置风扇
特点	效率高，成本低，可用于大型光伏电站	仅适用于小型光伏电站

2018.03印刷.indd 55 2018-3-23 16:33:04

器，例如美国 15 MW 空军基地光伏发电项目采用了 52 台 GT250(250 kW) 逆变器，德国莱比锡 6 MW 光伏项目采用了 11 台 GT500E(500 kW) 逆变器。

在选择了集中式逆变器的基础上，结合一期 50 MW_p 的装机容量及设备运输条件，若选用单台容量大的逆变器，其发生故障时发电系统损失发电量较大；若选用单台容量小的逆变器，所需逆变器数量较多，会增加后期维护的工作量。因此，从工程运行及维护角度考虑，经过对比，本工程推荐选用型号为 SSL0500 的逆变器，该逆变器输出额定功率为 500 kW，最大光伏输入功率可达 560 kW，最高转换效率高达 98.3%。

1.3 光伏方阵设计

1.3.1 光伏方阵布置

光伏电站经常使用的光伏组件支架有固定式支架、倾斜单轴跟踪支架、水平单轴跟踪支架等。综合地形、经济等方面的因素考虑，本工程光伏方阵的运行方式决定采用固定式，所以方阵支架采用固定式支架 [5]。光伏方阵的设计有 2 种选择方案，2 种方案对比如表 3 所示。

1) 方案 1：1 MW 逆变器单元 (2 台 500 kW 逆变器安放在一间逆变器室里) 与 2 个 500 kW_p 光伏方阵进行连接，从而组成 1 MW_p 光伏发电分系统。系统原理图如所图 1 示。

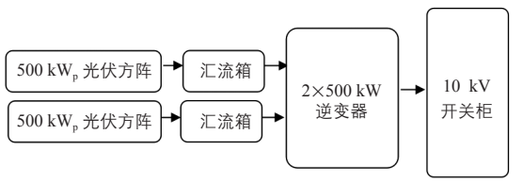


图 1 方案 1 光伏发电分系统原理框架图

2) 方案 2：500 kW 逆变器可与 1 个 500 kW_p 光伏方阵进行连接，从而组成 0.5 MW_p 光伏发电分系统。系统原理图如图 2 所示。

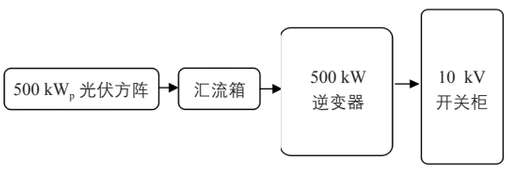


图 2 方案 2 光伏发电分系统原理框架图

表 3 光伏发电分系统方案对比

	方案 1	方案 2
布置	集中布置，易于安装、管理和维护	较灵活，易于布置
直流侧设备	直流电缆长，线损较高 (相同截面下)	直流电缆较短，线损较低 (相同截面下)
交流侧 35 kV 设备	35 kV 电缆根数少，35 kV 开关设备少，50 台 1000 kVA 中压变压器	35 kV 电缆数多 (2 倍), 35 kV 开关设备多 (2 倍), 100 台 500 kVA 中压变压器
经济性	较高	较低

综上所述，本并网光伏系统宜采用“集中安装建设，多支路上网”的技术路线，所以采用方案 1，即 1 MW 逆变器单元与 2 个 500 kW_p 光伏方阵进行连接的方案。

1.3.2 光伏子方阵设计

一个较大光伏发电总系统往往是由一个个小的光伏发电分系统组成，这样管理更方便，维修也更简便。本工程一期 50 MW_p 并网光伏发电总系统是由 50 个 1 MW_p 光伏发电分系统组合而成；每个 1 MW_p 光伏发电分系统是由 2 个 500 kW_p 光伏发电子系统组合而成；而 1 个光伏发电子系统是由 1 个 500 kW_p 光伏方阵和 1 台 500 kW 逆变器组成。在每个光伏发电分系统中，通过 2 台逆变器流出的交流电经过 1 台升压变压器，将电压从 270 V 升至 35 kV，当电压流到 35 kV 母线段后，再经过 1 台升压并网变压器，将电压从 35 kV 上升到 110 kV，同时将其并入电网 [6]。

1.3.3 光伏组件的串、并联

光伏方阵是由光伏组件通过串、并联组合而

2018.03印刷.indd 56 2018-3-23 16:33:04

成，并网逆变器的电压性能和光伏组件可以承受的最大电压决定了光伏组件所需要串联的数目，逆变器的容量大小则确定了并联数目。本工程采用 280 W_p 多晶硅光伏组件，并网逆变器的额定容量为 500 kW。根据实际计算，确定一个组串需要串联 18 块组件，每一路组件串联的额定功率容量为 280×18=5040 W_p；与此同时，按照逆变器的参数计算出并联路数 N 为 500/5.04=99.2 路，则取 100 路。所以，1 个 500 kW_p 的方阵的串联数为 18 块，并联组串数为 100 路。

1.4 光伏方阵接线方案设计

1.4.1 光伏方阵布置

每个 1 MW_p 光伏方阵有 200 个组串，每个组串需 18 块光伏组件，共 3600 块组件；对应布置 100 个支架，每个支架上布置 2 个组串，即 36 块组件。

因为复杂的地理环境，方阵阵列之间的间距和所处地理位置需根据当地的实际情况确定，尽量做到少占土地及节约电缆。

1.4.2 直流汇流及直流配电

并网光伏发电系统中的直流系统一般由光伏组件、光伏阵列防雷汇流箱、直流防雷配电柜、光伏并网逆变器及直流电缆组成。在大型并网光伏发电系统中，直流系统的设计尤为重要，选择合适的汇流箱和直流防雷配电柜可以优化直流系统设计，提高系统效率，降低发电成本。

直流汇流箱需具备以下特点：1) 可同时接入 16 路光伏阵列，可对 8 路组串电流监测；2) 每路输入回路的保护措施要用专用的高压直流熔丝。综合考虑技术及经济原因，本工程决定采用国产 SPVCB-16 型直流汇流箱。

直流防雷配电柜需要满足：1) 最大容量为 500 kW；2) 8 路直流输入接口，最大工作状态时可接 8 台汇流箱；3) 每路直流输入侧都有容易分断的断路器和防止方向变反的二极管。满足上述要求的选型即可优化直流系统 [7]。

2 电气设计部分

光伏发电系统是由光伏方阵、充放电控制器、逆变器、交流配电柜、太阳跟踪控制系统、监测系统等设备组成。并网光伏发电就是光伏组件产生的直流电，经过并网逆变器转换成符合市电电网要求的交流电，之后直接接入公共电网。图 3 为集中式并网光伏发电原理图。

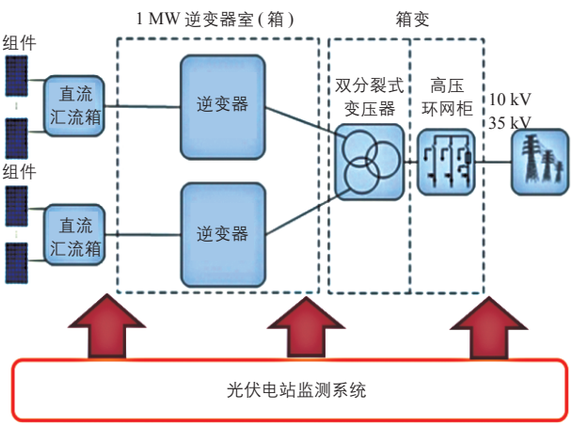


图 3 集中式并网光伏发电系统简图

2.1 电气一次主接线

西村光伏电站一期 50 MW_p 需按照近区电网的现状及发展情况选择合适的接入点，适合以 110 kV 电压等级接入系统。根据实际要求设计了 2 种方案：

1) 方案 1：西村光伏 1～3 期共新建 1 座 110 kV 升压站，最终以 1 回 110 kV 线路的形式接入系统。本期建成 1 回 110 kV 线路，然后接入 220 kV 海东变电站，线路的总长度为 11 km。

2) 方案 2：西村光伏 1～3 期共新建 1 座 110 kV 升压站，最终以 1 回 110 kV 线路接入系统。本期建成 1 回 110 kV 线路，然后接入到大营光伏 110 kV 升压站，大营光伏升压站为了满足汇集光伏送出需要，本期需建成大营－海东变电站 II 线路。

对 2 种方案进行对比分析可知，方案 1 投资成本少，年费用少，潮流走向合理。方案 2 中，西村光伏送至大营光伏升压站后再接入海东变电站，新建线路长，潮流迂回，损耗大；另外，西

2018.03印刷.indd 57 2018-3-23 16:33:04

村光伏接入大营后，挤占了其后续建设光伏电站的外送空间。综上所述，推荐方案 1。

本项目交流并网电压为 110 kV，可采取由逆变器交流输出 270 V $\xrightarrow{\text{升压}}$ 35 kV $\xrightarrow{\text{升压}}$ 110 kV 升压并网的方式实现太阳能交流输出的汇集并网。这种方式共采用容量为 1000 kVA、0.27/35 kV 逆变升压变压器 50 台，分别将每 1 MW_p 逆变器的 270 V 交流输出电压升至 35 kV 后，用 35 kV 电缆汇流至升压站 35 kV 母线，再通过 1 台容量为 75 MVA(考虑整个电站项目期共 150 MW_p 光伏安装容量)、35/110 kV 主变压器升压至 110 kV 后接入电网 [8]。

2.2 升压站电气主接线

在并网光伏电站中建设一座 110 kV 升压站，升压站一共可分为 3 个电压层次：0.4 kV、35 kV 和 110 kV。其中 0.4 kV 为低压站用电压，35 kV 为光伏方阵逆变升压电压，110 kV 为接入系统电压。75 MW 的电能经过 1 台 110 kV 主变压器将其自身的电压升压至 110 kV，最后再并入其对应的电网中。由于西村光伏电站整体项目规模为 150 MW_p，所以一共需要 2 台主变压器来实现。光伏发电子方阵经升压变压器升压后串接，接入光伏电站内 35 kV 配电室，经过箱式变压器回流后接入 35 kV 母线，经过升压后送入 110 kV 配电装置。

1)110 kV 系统接线：110 kV 是一期 50 MW_p 电能接入系统的电压等级。主变终期容量 2×75 MVA，安装 1 台 75 MVA 主变压器，经 110 kV 组合电器接入 110 kV 母线侧，并通过 1 回 110 kV 线路接入 220 kV 海东变，实现和电网的连接。

2)35 kV 系统接线：一期工程出线 3 回，35 kV-I 段母线包括 1 台主变进线柜，3 台电缆出线柜、1 台无功补偿柜、1 台母线 PT 柜、1 台站用变柜，共 7 台。后期工作方面：设置 35 kV-I 段母线，预留 35 kV-II 段配电装置场地，35 kV-I 段母线终期为 5 回出线。

站用电 380/220 V 系统采用单母线分段接线，设 0.4 kV-I 段、0.4 kV-II 段 2 段母线，1# 站用变电源进线接至 0.4 kV-I 段， 2# 站用变电源进线接至 0.4 kV-II 段，施工 / 备用变电源进线分别接至 0.4 kV-I 段和 0.4 kV-II 段，I 段和 II 段之间设分段断路器。进线开关采用智能型框架断路器，进线及分段断路器额定电流为 800 A。厂用电采用双电源供电，一路电源由 35 kV 施工电源 (施工变) 改造而来，该电源规划引自附近 35 kV 变电站，经过 35 kV 施工变降压接入 0.4 kV 母线；另一路引自本站 35 kV 母线，经过厂用干式降压变接入 0.4 kV 母线。低压配电室设置厂用双电源自动切换柜和低压配电柜 [9]。

2.3 电气二次部分

并网光伏发电系统采用的监控方式是集中式控制，把所需要监视的范围集中在一起进行统一监控。主要采用的监控技术是微机保护装置计算机网络监控系统，从而完成全站机电设备的数据采集，并将采集到的数据用来监视、控制、测量、保护等。采集的数据和电站的实际运行参数等主要信息通过网络的形式上传到特定的监控计算机，从而实现远程监控。

本工程监控系统的监控规模大致包含光伏方阵、逆变器、升压站等电气系统。在升压站的领域内成立一个主控制室，控制室的工作人员通过大屏幕和 LED 监控系统的运行情况；主控室内还设有工业电视监视墙，即在墙上安放一个巨幕，同时也安装了闭路电视和火灾报警器等设备。计算机监控系统的覆盖范围包括光伏发电单元和 35/110 kV 升压站系统，时间记载功能可以用 GPS 设备来完成时间校准。

2.4 防雷屏蔽措施

光伏发电作为最近几年兴起的一种环保型发电产业，国内还暂未出台光伏电站防雷设计的明确规范说明。雷电保护区的划分如图 4 所示。

由图 4 分析可知，一个被保护的区域，由外到内可以划分为不一样的被保护等级：最危险的区域就是最外层的 0 区，越往内部，危险程度越

2018.03印刷.indd 58 2018-3-23 16:33:05

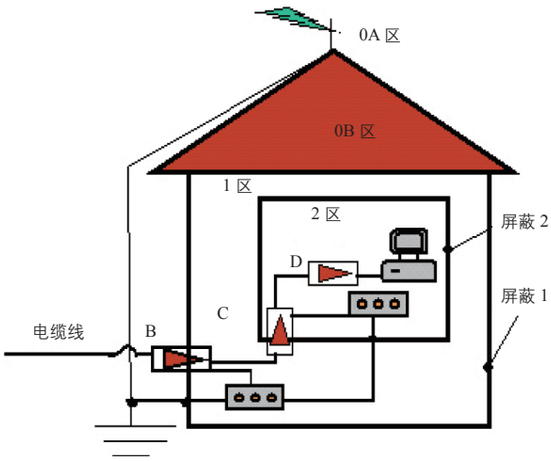


图 4 雷电保护区的划分

低，最里面的空间部分则是被保护的最好的。很显然，电站内的逆变升压机房只获得了一层屏蔽，因为它与 0 区之间只有一面墙的距离；成套机房内的空间被定义为 1 区；机房内各电气设备的外壳则成为一层屏蔽层，电气设备内的空间则定义为 2 区。

相应的在线路屏蔽措施方面，由于光伏电站场地非常开阔，所占面积也非常大，光伏方阵里大量的电缆暴露在户外，很容易遭受到直击雷，易对电缆产生伤害。因此，在实际情况允许的范围内，电缆应该沿电缆槽盒、桥架敷设和铺设桥架盖板，从而防止直击雷的打击，起到保护电缆的作用。

3 结语

云南省大理州宾川县西村并网光伏电站一期工程规模容量为 50 MW_p，预计建成后的 25 年年平均发电量将达到 69812.08 MWh，年利用小时数可高达 1396.24 h。本项目的太阳能资源条件好，所选场址的工程建设条件满足项目规划建设容量的要求，项目建成后的上网含税电价相对较低，是云南省最好的大型光伏发电项目之一。光伏电站的投资大、运行费用低、发电成本较高，需要获得较大的政策支持力度。根据我国国情，在我国太阳能资源丰富的地方建设并网光伏电站，并提供适当的并网光伏发电补贴，可促进光伏产业各个环节的发展，从而促进我国光伏发电的有效发展。

参考文献

[1] 罗杰 . 光伏发电并网及其相关技术发展现状与展望 [J]. 低碳技术 , 2016, 27(44): 71 － 72.
[2] 艾欣 , 韩晓男 , 孙英云 . 光伏发电并网及其相关技术发展现状与展望 [J]. 现代电力 , 2013, 30(1): 1 － 2.
[3] 宋浩平 . 大型并网光伏电站电池组件的选型讨论 [J]. 甘肃水利水电技术 , 2015, 5(10): 53 － 55.
[4] 王巍 . 光伏并网逆变器的选型设计 [J]. 科技创业家 , 2012, 10(51): 10.
[5] 朱琳 . 浅谈大型并网光伏电站系统设计 [J]. 电子世界 , 2012, 7(18): 58 － 59.
[6] 管仁德 , 李建泉 , 张蓉 , 等 . 建筑光伏并网电站系统设计 [J]. 大功率变流技术 , 2013, 6(6): 15 － 20.
[7] 刘张强 . 大型地面并网光伏电站电气系统浅论 [J]. 电力讯息 , 2017, 5(2): 224 － 225.
[8] 孙志清 . 光伏并网发电系统接入设计及电气影响分析 [J]. 信息通信 , 2013, 5(60): 60 － 61.
[9] 崔自刚 . 50MW_p 并网光伏电站发电系统研究 [D]. 北京 : 华北电力大学 , 2014.

（接第 61 页）

4 结束语

根据现阶段“领跑者”项目及“超级领跑者”项目规划，大部分项目所在地的地形坡度大、地质情况复杂，机械施工非常困难。本项目提出的高强灌浆料在微孔锚杆灌注桩基础中的应用能够很好地解决现阶段复杂山地光伏电站所面临的问题，为后期山地光伏电站设计提供参考。

参考文献

[1] 谢炜 , 王雨 . 山地农业光伏支架基础方案分析 [J]. 山西建筑 , 2017, 43(1): 92 － 94.
[2] 刘洋 , 李文军 . 浅谈螺旋桩、灌注钢管桩在山地光伏电站运用中的几点优势 [J]. 水电站机电技术 , 2016, 39(s1): 45 － 46.
[3] 孙海燕 . 岩石锚杆基础在某山地光伏电站中的应用 [J]. 中国高新技术企业 , 2015, (14): 58 － 59.

2018.03印刷.indd 59 2018-3-23 16:33:05