

青藏高原地区光伏配套储能系统设计及运行研究

栗刚¹, 李科峰¹, 王辉¹, 郎春雷¹, 晏小彬²

(1. 国家电力投资集团有限公司西藏分公司, 西藏 拉萨 851414;

2. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要: 西藏太阳能资源丰富, 提升光伏应用水平对于提高电力保障能力, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系具有重要意义。针对青藏高原地区极端条件造成的地区电网电源供电能力不足、光伏利用小时数较低以及电网安全稳定影响较大等问题, 以海拔4700 m的西藏当雄羊易10 MW光伏电站配套储能项目为例进行了研究。首先, 研究了高海拔电池储能系统的设计方法, 提出了储能变流器的高海拔修正策略和降容选型原则, 分析了电池系统的热管理设计方法; 然后, 对光储控制系统架构和控制策略进行了详细阐述分析; 最后, 结合政府保供政策和投资运维费用, 对该项目储能系统的经济性进行了分析评价。研究结果可为高原地区光伏配套储能系统的设计提供参考。

关键词: 电池储能系统; 高海拔修正; 光储控制策略; 经济性评价

中图分类号: TM 910 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)03-0027-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230305

Research on Design and Operation of Photovoltaic-Energy Storage System in Tibet Plateau

SU Gang¹, LI Kefeng¹, WANG Hui¹, LANG Chunlei¹, YAN Xiaobin²

(1. Tibet Branch of State Power Investment Group Co., Ltd., Lhasa 851414, Tibet, China;

2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Tibet is rich in solar energy resources, and promoting the application level of photovoltaic is of great significance for improving power security and building a clean, low-carbon, safe and efficient energy system. Aiming at the problems caused by the extreme conditions in Tibetan Plateau region, such as insufficient power supply capacity of regional power grid, low photovoltaic utilization hours, and great influence of photovoltaic on power grid security and stability, the research is carried out taking the energy storage project of Yangyi 10 MW photovoltaic power station for example, which is connected to Tibet Dangxiong power station at an altitude of 4,700 meters. Firstly, the design of high-altitude battery energy storage system is studied, the high altitude correction strategy and the selection principle to reduce capacity for energy storage converter are proposed, and the thermal management design of battery system is analyzed. Then the architecture and control strategy of photovoltaic-energy storage control system are analyzed in details. Finally, combined with the power supply guarantee policy made by the government and the investment costs on operation and maintenance, the economy of energy storage system of this project is analyzed and evaluated. The results can provide a reference for the design of photovoltaic-energy storage system in plateau area.

Key words: battery energy storage system; high altitude correction; photovoltaic-energy storage control strategy; economic evaluation

0 引言

西藏有着丰富的太阳能资源, 通过对太阳能进

行合理有序地开发利用, 建设资源节约型、环境友好型能源基地, 将节能减排与可再生能源发展形成有机结合, 可促进地区电力事业、生态保护、区域经济的可持续发展^[1-2]。随着“双碳”目标的推进以及新

型电力系统的建设,新能源发电规模日益增大,其间歇性和波动性问题对电网的影响越来越突出,导致在一些电网薄弱地区弃光率较高^[3-6]。2021年,西藏地区以19.8%的弃光率高居全国首位^[7]。因此,研究高原地区电池储能系统设计方法,比较分析光储电站控制系统架构,开展光储配套系统运行经济性评价,对于建设清洁低碳、安全高效能源体系,以及增加电网保供能力、充分利用弃光电量、保障光伏利用小时数等具有重要的现实意义和深远的战略意义。

国内外学者已对光伏配套储能系统的选型设计及优化控制开展了较多的研究。文献[8-10]通过对不同类型组件的性能和空间要求进行分析,研究各组件的环境适应能力,针对不同系统提出了对应的储能方式。文献[11-12]将分布式模块化变流器技术、物联网技术、智能控制技术和蓄电池相结合,设计了一种新型智慧蓄电池的结构。为了将系统的光伏自我消纳水平得到切实保障,文献[13-14]将储能系统与光伏发电模式进行了充分整合,明确电池储能容量配置及经济效益的变化规律。文献[15]提出了一种将光伏组件与储能电池有机结合构成光伏-储能单元,克服了集中式或普通分布式光储系统存在的稳定性差、容量利用率低和质量比功率低等问题。为了对储能系统的经济性进行评价,文献[16-17]考虑寿命衰减及电价机制,评估了电池储能系统在整个寿命期内的能量吞吐量和平准化储能成本,提出了电池储能系统技术经济分析框架。以上文献对光伏配套储能系统进行了较为充分的研究,但是并未考虑西藏高海拔、长距离、电网动态无功支撑能力较弱等因素对储能系统的影响。

下面以海拔4700 m的西藏当雄羊易10 MW光伏电站配套储能为例,研究了高海拔储能系统设计方法,包括储能系统配置、储能变流器绝缘修正及散热校核、电池系统热管理设计,并分析了光储电站的控制架构和策略设计,最后结合当地电网政策和实际运行时长等因素对储能系统的经济性进行了评价。

1 项目建设概况

当雄羊易10 MW光伏电站位于拉萨市当雄县羊易村境内,海拔高程在4700 m,是目前世界上海拔最高的光伏电站。工程站址东北距当雄县约

110 km,东距拉萨市约180 km。S304省道从站址北侧通过,交通便利,运输方便。

该光伏电站以35 kV汇集后升压至110 kV,通过1回110 kV线路接入羊易汇集开关站,羊易汇集开关站通过1回110 kV线路接入110 kV佳木变电站,接入系统方案如图1所示。由于西藏电网新能源承载能力较低且调峰电源缺乏,2021年弃光率达到36.5%。为了提高羊易光伏电站的利用率,在该光伏电站配置电化学储能2 MW/10 MWh,储能升压至35 kV后接入电站35 kV汇集母线。

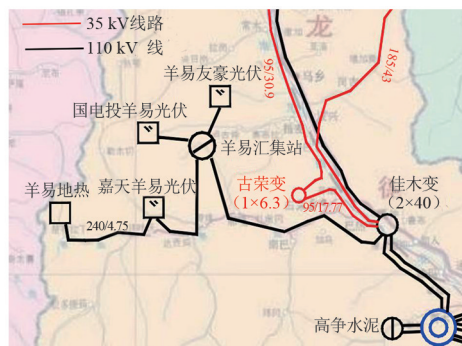


图1 接入系统方案

2 储能系统设计

2.1 储能系统配置

10 MW羊易光伏电站配套储能,采用单个2 MW/10 MWh储能单元,放电倍率为0.25C,由4组2.5 MWh电池堆分别经4台500 kW变流器逆变成交流550 V,4台变流器交流侧两两并联接入升压变压器的低压双分裂绕组,储能单元接线如图2所示,升压变压器采用油浸式变压器,变比为35 kV/0.55 kV,容量为2280 kVA。

2 MW/10 MWh储能单元实际主设备由1个变流升压舱和2个电池集装箱组成。变流升压舱由4台户外型储能变流器(power conversion system, PCS)及1台升压变压器构成。单个电池集装箱内包含两堆电池,每堆7簇,单簇电池由25个1并16串的电池模组串联构成,单堆容量为2 508.8 kWh,单舱容量为5 017.6 kWh。储能系统内变压器、断路器等常规设备选型均按5000 m高海拔型设备选择。

2.2 储能变流器设计

PCS采用强迫风冷散热,应用于高海拔环境时,随着海拔升高,空气密度降低,气温降低,对变流器运行有较大影响,主要影响因素如表1所示。

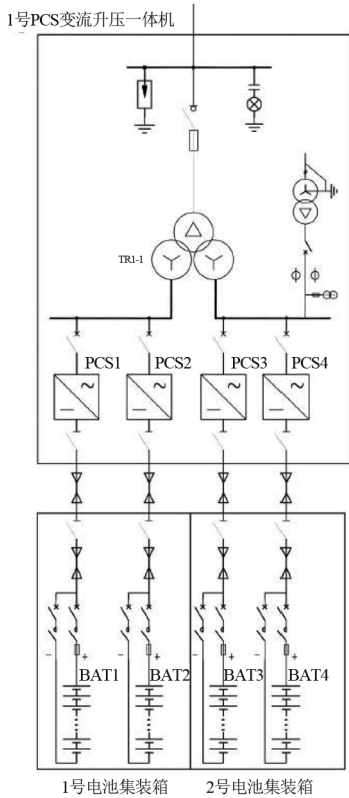


图2 储能单元接线

表1 变流器高海拔应用影响因素分析

影响因素	变化趋势	影响
气压与空气密度	下降	绝缘强度:影响电气距离等; 影响散热:不利于风冷散热。
气温	下降	每升高 1000 m,气温下降 6℃, 有利于散热。
断路器等开关器件 高海拔降容需求	降容	以海拔 2000 m 为基准,超过 2000 m,每升高 100 m降容 1%。

从表1可以看出,海拔升高对变流器的不利影响主要体现在电气间隙与爬电距离、风冷散热以及断路器等开关器件的降容等3个方面。

1) 电气距离校核

空气绝缘强度随着海拔升高而降低,同时对电气间隙和爬电距离的要求更高。这也是变流器在高海拔设计时考虑的第一要素。由于PCS为低压电器,电气间隙和爬电距离的设计相对其工作电压等级而言已经有较大裕量。

以所述项目为例,由于PCS直流侧电压最高为1500 V,交流侧电压为690 V(进行了降额应用,断路器额定电压800 V降额到0.7倍使用,实际使用交流侧电压为550 V),由于变流器属于低压电器,实际设计时考虑的极限电气间隙(>10 mm)与爬电距离(>20 mm)要求远大于PCS实际电压等级对电气间隙和爬电距离的要求。

依据国家标准 GB 4793.1—2007《测量、控制和实验用电气设备的安全要求》^[18],获取到相关的电气距离倍增系数为1.48。按照低海拔低压系统在低海拔下电气距离10 mm核算,在5000 m海拔场景下,电气距离需要保证不小于15 mm来进行校核。

2) 整机内部风冷散热校核

针对变流器额定功率下的散热情况进行了高海拔场景下的热仿真。

图3为变流器功率模组散热路径示意图。主功率舱风道主要包括百叶窗、风机、模组、电抗器、进风口及相关通道钣金连接件。散热风机采用大风量、大风压的离心风机匹配鼓风式风道结构,采用上进风,下出风结构。

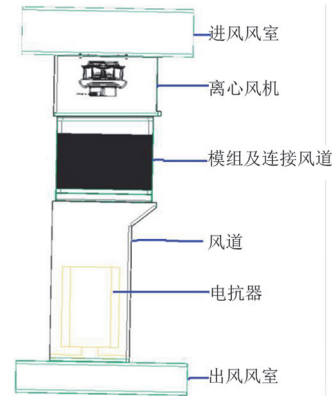


图3 变流器模组散热风道

变流器功率器件为绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),功率器件应用时温度升高,需依靠散热器来保证其安全正常工作。风机置于功率模块顶部,四周用钣金围成密闭风腔,3个功率模块散热器顶部与风腔接触面开有对应进风口,每个功率模块散热器底部开有方形出风口。空气通过箱壁百叶窗进入变流器内部,经风机四周叶片甩出到风腔内;然后,通过风腔挤压至功率模块进风口处流入功率模块散热器;最后,通过底部功率模块出风口排出,形成风道回路。

仿真结果如下:进风口采用面板表面开孔结构,孔口有一定倾斜度的挡板具备防止雨水主动进入的作用,进风侧的开孔率为25%。

该变流器应用于高海拔(4700 m)工况下,变流器容量降容、额定电流降容,故对应功率器件的发热功率也按比例降容。单个功率模组总损耗为6.8 kW。1000 m海拔以下,风机的风压-风量曲线如图4所示。

随着海拔高度的增加,达到 5000 m 后风机静压与常规差值为 200 Pa,因此仿真过程中需按照降容后的风压-风量曲线作为输入。基于上述信息建立仿真模型并得到散热器表面温度分度云图,如图 5 所示。

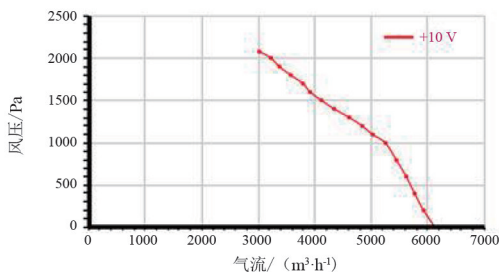


图 4 1000 m 以下离心风机风压-风量曲线

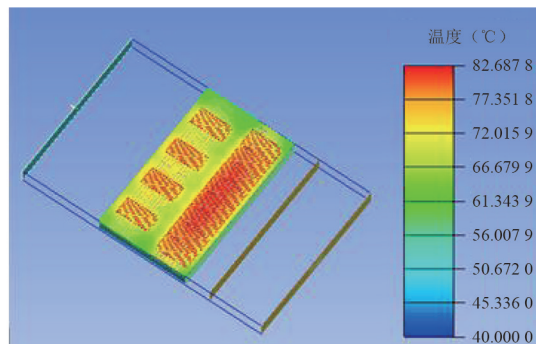


图 5 散热器表面温度分度云图

在环境温度 40 °C 条件下,变流器 ABC 三相模组的散热器表面温升最大为 42 K,满足设计要求 (<45 K)。相关内部气流速度分布如图 6 所示。仿真结果显示,散热满足工程应用要求。

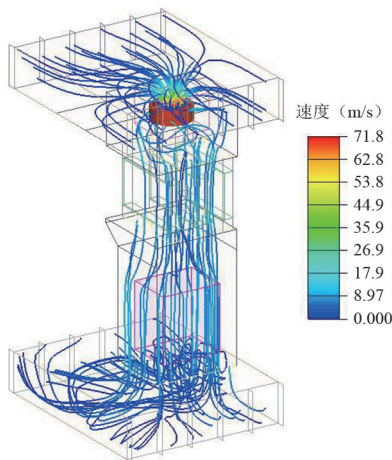


图 6 变流器散热内部气流速度分布仿真

3) 器件降容校核

针对储能变流器内的所有核心电气元件,对高海拔场景下的电压和电流参数的降额运行情况进行

校核,主要包括直流断路器、直流熔断器、交流断路器、交流电抗器等,校核结果如表 2 所示。

表 2 储能变流器内部分器件高海拔(5000 m)校核

设备	电压降额系数	电流降额系数
直流断路器	1.0	1.00
直流熔断器	1.0	0.85
交流断路器	0.7	0.92
交流电抗器	1.0	0.60

2.3 电池系统热管理设计

电池系统电压范围为 1000~1460 V,按 1500 V 对电芯和电池系统直流侧元器件在 5000 m 高海拔条件下进行绝缘校核,低压器件的选型和绝缘间隙的设计均应满足绝缘要求^[19]。

电池系统的主要发热器件为电芯,在电池充放电过程中,会产生一定的热量。为满足电芯合理的工作温度范围,需进行散热系统设计。电池舱采用空调散热,风管安装在舱顶及侧壁上,空调出风口对接风管将冷风送至电池簇间;电池模组自身风机抽冷风,对电池单体进行冷却。每套储能电池配置独立工业空调,对称布置,通过风管导流确保舱内气流组织合理,保证电池模组温升均匀一致。在高海拔环境应用,需考虑模组散热风机特性曲线随海拔升高的变化以及空调的高海拔降容选型。

1) 空调选型设计

高海拔条件下,空调性能衰减比的经验值如表 3 所示。

表 3 空调制冷量和制热量随海拔衰减系数

海拔/m	制冷量衰减比/%	制热量衰减比/%
<2000	0	0
2000	10	14
3000	15	21
4000	20	28
5000	25	35

所述项目应用于 4700 m 海拔条件下,电芯的充放电倍率为 0.25C,电芯单体发热量按 4 W 计算。根据电池堆配置,初步核算电池堆级电池发热量为 11.2 kW,考虑箱体两堆电池及箱体热辐射,总散热量为 27.4 kW。

选用单个空调的标称制冷量为 15 kW,在外界环境温度 45 °C、舱内环境温度 25 °C 条件下,空调制冷量为 12 kW。根据表 2 高海拔制冷量降容后,实际单个空调制冷量为 9 kW,单舱选用 4 个空调,高

海拔下的制冷总量为 36 kW,可满足电池舱的热管理要求。

2) 散热仿真计算

空调风道由两部分组成,主风道水平出风,电池簇上方与主风道之间通过子风道连接,保证纵向从簇顶到簇底的送风量。空调出风口送出冷空气,通过对空调送风风道的设计以及电池模块轴流风机的应用,改善集装箱内空气的流场分布,确保每个电池模组都能引入空调的冷风。

空调额定制冷量为 15 kW,送风风量为 4500 m³/h。由于电池舱两侧 14 个电池簇呈对称布置,仿真建模取 1/4(3.5 个电池簇+1 台空调)。舱内空气流线仿真结果如图 7 所示。

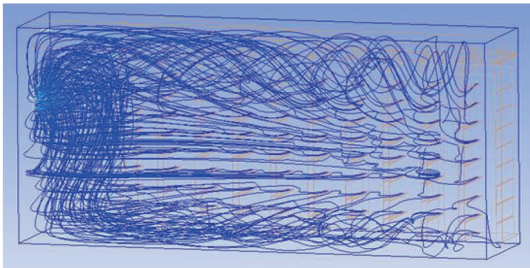


图 7 储能电池集装箱舱内流线分布

由于 280 Ah 储能电芯的合理工作温度范围为 20~35 ℃。根据仿真输入,最终舱内电芯温度分布如图 8 所示,满足电芯使用的工作环境。

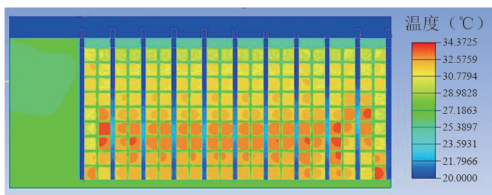


图 8 储能电池温度分布

3 控制系统设计

3.1 控制系统架构

光伏电站的储能控制系统架构如图 9 所示。

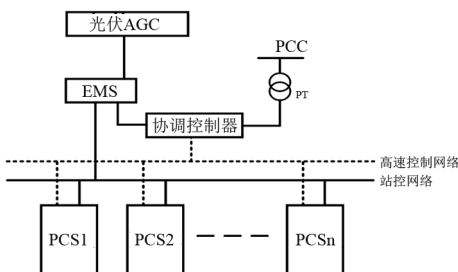


图 9 储能控制系统架构

系统中配置储能监控系统对储能设备进行监视,配置储能协调控制器进行储能自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 以及多 PCS 功率分配,并实现储能快速功率控制功能。同时和光伏电站 AGC 进行对接,接受光伏 AGC 的分配的控制指令。

光储协调主要有联合控制和独立控制两种模式^[20],可根据电网要求进行模式选择。

3.2 光储联合控制

光储联合控制模式下,电网调度机构按原有光伏电站的调度模式,给电站下发单个 AGC 调节指令,储能充放电指令由光伏电站 AGC 系统根据 AGC 指令和光伏实时发电功率计算得到,主要有以下 3 种控制策略:

1) 精确跟踪调度 AGC、减小弃光策略

当需要根据电网计划或实时指令实时跟踪调整并网出力时,可采用光储联合跟踪控制模式,利用储能吸收光伏逆变器多余发电,减少弃光。在限电情况下,优先控制储能增加充电功率或降低放电功率,在储能无充电能力的情况下才考虑弃光。当并网总功率不能满足调度计划时,优先提高光伏逆变器出力,若仅靠光电出力无法满足调度目标,控制储能增加放电功率或降低充电功率。

2) 功率预测曲线补偿策略

根据当地功率预测考核规则,功率预测考核仅限于不限电时段。其中在不限电时段,短期功率预测考核计算逻辑为前日上送的功率预测曲线和当日输出功率比较,差异越小,准确率越高。前日上送的预测曲线不可变更,当日输出功率可以借由储能调节。控制储能出力,跟踪前日上报的功率预测曲线,达到提升功率预测准确率的目的,从而减少考核电量(处罚),提高效益。

根据考核指标,实时计算预测曲线最大误差值,当光伏总出力超出规定的指标范围前(需设定启动值和储能动作时间),对储能进行充放电控制,使得光储联合总出力在考核范围之内。在补偿过程中,通过设定电池充电状态的上、下阈值,避免储能过充、过放。

3) 平抑发电功率波动策略

光伏发电由于具有较大的间歇性和波动性,其并网发电的性能会受到严重影响。电池储能系统可以通过电池的充、放电来平抑光伏发电的功率波动。

平抑波动控制根据算法分为一阶滤波控制方式和功率波动限制控制方式^[21],可通过控制字整定。一阶滤波控制策略是根据电源端的输出功率进行一阶低通滤波,对于变化快速且不满足波动限制要求的功率分量,利用储能系统来消除,因此剩下的就是波动小的平滑功率分量了。功率波动限制控制策略是实时检测电源端的输出功率,统计其在一定时间周期内的波动量,若功率波动分量超出装置设定的波动限制值,则储能系统进行充、放电,抑制波动量。可通过定值整定,使得控制目标满足不同时间尺度的功率波动限制。平抑波动效果如图 10 所示。

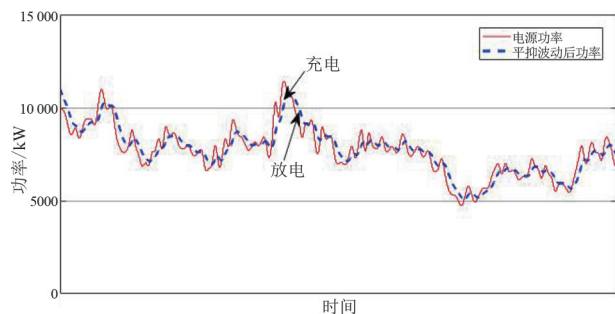


图 10 储能平抑波动效果

3.3 光储独立控制

光储独立控制模式下,储能系统由调度系统直接控制。光储电站可采用光、储独立控制模式运行,光伏 AGC 和储能 AGC 各自独立控制和独立考核,储能系统独立充放电控制主要有以下两种控制策略:

1) 按调度 AGC 实时指令控制

调度向光电 AGC 系统和储能 AGC 系统分别下发光电有功目标指令和储能有功目标指令,储能根据调度储能 AGC 指令进行充放电出力,并上送储能实际充放功率、储能充放电上下限等交互信号,调度根据光电 AGC、储能 AGC 上送的实际功率与目标指令分别独立进行比对考核。该运行方式下,光电 AGC 上送的光伏实发功率不包含储能充放功率。

2) 按设定的有功功率计划曲线控制

按照峰谷电价或参与电网调峰要求,制定峰谷跟踪计划曲线,设定高峰时段和低谷时段及相应时段的充、放电功率。当处于高峰时段,储能切换为放电模式,以设定的放电功率向电网返送电能;当处于低谷时段,储能切换为充电模式,以设定的充电功率从电网吸收电能。

3.4 快速一次调频控制

为了对电网的频率支撑做出贡献,储能系统具备快速一次调频控制功能,通过储能协调控制装置和 PCS 之间的快速通信架构,构建储能快速功率控制系统。

储能协调控制装置采集光伏电站并网点电压和电流参数,同时计算电网频率,按照图 11 所示的一次调频控制来调节储能系统的有功输出,从而完成快速辅助调频。图中: f_1, f_2, f_3, f_4 为可设置频率参数,参数可根据电网调度需求设置; $[f_2, f_3]$ 为频率死区范围。当系统频率越过死区范围时,协调控制器快速响应生成有功指令,并通过快速通讯将指令发送给 PCS 执行,控制储能系统进行快速有功功率调节,设计响应时间小于 100 ms。

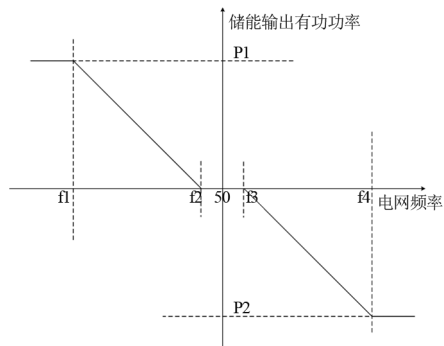


图 11 一次调频控制

一次调频通过有功功率-频率(P-F)下垂控制来调节有功功率,当系统频率下降时,储能系统放电增加有功功率输出;当系统频率上升时,储能系统充电减小有功功率输出。调频效果如图 12 所示。

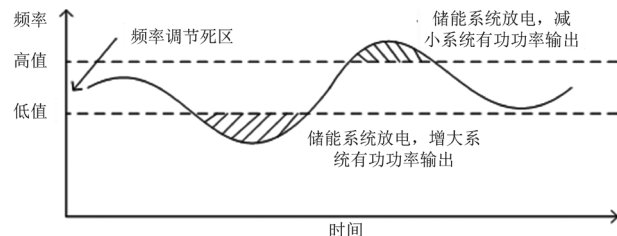


图 12 一次调频效果

4 储能系统经济性评价

4.1 项目投资

该项目总装机容量为 10 MWh,预计年平均上网电量约 2 471.56 MWh。项目建设总工期为 3 个月,财务评价计算期为 13 年,其中建设期 3 个月,运行期 12 年。

4.1.1 资金来源

1) 固定资产投资

根据工程投资概算,工程固定资产静态投资为1 947.7万元。建设期借款按复利计算利息,该项目计入固定资产的建设期利息为4.48万元。

2) 流动资金

流动资金按30元/kWh估算,总计30万元。流动资金全部自有,流动资金随储能设备投产投入使用,在计算期末一次性收回。

4.1.2 总成本费用

发电总成本费用包括折旧费、维修费、工资及福利费、保险费、材料费、摊销费、利息支出和其他费用等。

1) 折旧费折旧年限取10年,残值为3%。

2) 保险费取固定资产原值的0.057 5%。

3) 材料费和其他费用取固定资产投资的0.3%。

4) 利息支出为固定资产和流动资金等在运行期应从成本中支付的借款利息。

4.2 发电效益

4.2.1 上网电价及补贴

根据西藏自治区发改委2018年发布的《西藏自治区人民政府关于进一步规范和理顺全区上网电价及销售电价的通知》,羊易光伏电站标杆上网电价为0.1元/kWh。根据国家发改委关于《完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知》等相关文件确定,羊易电站的补贴价格为0.8元/kWh。

4.2.2 发电收入

上网电量考虑:磷酸铁锂储能电池充放电深度取90%;系统放电效率为87%;电池每年按照1.6%的速度衰减。根据光伏电站设备及送出线路检修历史情况,储能电站有效充电时间按350天考虑,则首年充放电一次的上网电量为2 696.65 MWh。按此计算上网电量如表4所示。

表4 上网电量

年份	2023	2024	2025	2026	...
可用百分比/%	98.4	96.8	95.3	93.8	...
上网电量/MWh	2 696.65	2 653.51	2 611.05	2 569.27	...

在计算期内,发电利润总额为299.51万元。

4.2.3 税金

根据国家税收政策,电力项目缴纳的税金包括增值税、销售税金附加和所得税。电力产品增值税

税率为13.00%,经计算,该项目固定资产可抵扣的增值税额约为165.28万元。销售税金附加包括城市维护建设税和教育费附加(含国家和地方教育费附加),以增值税税额为基础计征,税率分别取5.00%和5.00%。所得税按照9.00%的税率征收。

4.2.4 发电利润

税后利润提取10.0%的法定盈余公积金,剩余部分为可分配利润,再扣除分配给投资者的应付利润,即为未分配利润。在计算期内,利润总额为299.51万元,税后利润为271.63万元。

4.3 评价结果

通过对羊易光伏电站配置储能前后电站收益率进行测算,该电站配置储能投资财务内部收益率为3.75%,资本金财务内部收益率为9.48%,投资回收期为10.47年。资本金财务内部收益率(9.48%)不低于资本金基准收益率(8%)。因此,财务评价为可行,通过配置储能能够有效提高电站的收益率,同时减少由于消纳限制而引起的弃电。

5 结 论

结合海拔4700 m的西藏当雄10 MW羊易光伏电站配套储能项目,研究了高海拔电池储能系统的设计方法,提出了储能变流器的高海拔修正策略和降容选型原则,并对该项目储能系统的经济性进行了分析评价,主要结论如下:

1) 西藏当雄10 MW羊易光伏电站配套储能项目,设计采用单个2 MW/10 MWh储能单元。储能变流器采用强迫风冷散热,变流器ABC三相模组的散热器表面温升最大为42 K,满足小于45 K的设计要求。电池舱采用空调散热,通过风管导热确保舱内气流组织合理,保证电池模组温升均匀一致。储能系统设计在满足工作环境使用需求的基础上留有余量。

2) 控制系统中配置储能监控系统和储能协调控制器对储能设备进行监视和自动功率控制,同时完成多PCS功率分配,实现储能全站的监视控制、能量管理,并实现与新能源厂站监控系统及调度集控等信息交互。

3) 对该项目的经济性进行分析评价可得,电站在不考虑储能配置的情况下资本金财务内部收益率为12.19%,配置储能后资本金财务内部收益率为

17.31%。所提出的配置储能方法能够有效提高电站的收益率,同时减少由于消纳限制而引起的弃电。

参考文献

[1] 孙雯雯,徐玉杰,丁捷,等.高原高寒地区可再生能源与储能集成供能系统研究[J].储能科学与技术,2019,8(4):678-688.

[2] 赵斌,呼如威,蒋东方,等.高寒高海拔地区微网储能锂电池系统优化设计[J].中国电力,2020,53(5):128-134.

[3] 杨凌帆,刘倩,张雨金,等.基于光伏发电影响因素分析的集成建模及预测应用[J].中国计量大学学报,2019,30(2):158-165.

[4] 陈刚,袁越,傅质馨.储能电池平抑光伏发电波动的应用[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(2):27-31.

[5] JIN-XIN L I, ZHANG J C, ZHOU Y. Energy Management Strategy of wind-PV-ES Hybrid Power System[J]. East China Electric Power, 2011, 39(11):2026-2029.

[6] 王玥娇,张兴友,郭俊山.储能技术在高比例可再生能源电力系统中的应用[J].山东电力技术,2021,48(7):19-25.

[7] 赵斌,谭恒,梁告,等.高原高寒地区局部阴影下光伏阵列输出功率提升实验研究[J].中国电力,2021,54(8):199-208.

[8] EDIFOMN A-O I, EDWIN N I, MACAULAY E U. Comparative analysis of the performance of different photovoltaic (PV) technologies based on PVSyst thermal model [J]. Science Journal of Energy Engineering, 2016,4(6):62-67.

[9] EKE R, BETTS T R, GOTTSCHALGR. Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,69:429-434.

[10] LI L Y, LIU P, LI Z, et al. A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems [J]. Computers & Chemical Engineering, 2018, 115: 213-225.

[11] 彭伟,郑连清,郑天文.分布式光伏储能系统的优化

配置方法[J].四川电力技术,2022,45(1):45-49.

[12] 王超,胡浩,郑炼,等.基于智慧蓄电池的光伏储能系统及其控制策略[J].可再生能源,2022,40(4):506-512.

[13] 钟倩文,孙以泽,陈玉洁,等.基于图形逻辑分析的光伏储能系统能量管理方法[J].太阳能学报,2020,41(3):291-297.

[14] 吴边.光伏储能系统的电池容量配置研究[J].科学与信息化.,2022,1(7):136.

[15] 曾国宏,潘一飞,吴学智.新型分布式光伏-储能系统设计及控制策略的研究[J].电源学报,2020,18(4):144-150.

[16] 冯晓丽.光伏储能电站的经济性分析[J].电工电能新技术,2019,38(9):52-58.

[17] 田玉婷,魏巍,孙昕炜,等.考虑寿命衰减及电价机制的电池储能系统技术经济研究[J].四川电力技术,2022,45(5):1-5.

[18] 中国电子技术标准化研究所.测量、控制和实验用电气设备的安全要求 第 1 部分:通用要求:GB 4793.1—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.

[19] 全国低压电器标准化技术委员会.低压系统内设备的绝缘配合:第 1 部分:原理、要求和试验.GB/T 16935.1—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

[20] 马伟,王玮,吴学智,等.光储协调互补平抑功率波动策略及经济性分析[J].电网技术,2018,42(3):730-737.

[21] 孙玉树,唐西胜,孙晓哲,等.风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(S1):88-97.

作者简介:

粟刚(1975),男,工程师、高级人力资源师,研究方向为光伏发电并网与消纳;

李科峰(1982),男,高级工程师,研究方向为新能源并网;

王辉(1976),男,工程师,研究方向为新能源并网;

郎春雷(1980),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源并网。

(收稿日期:2022-11-23)

欢迎投稿

欢迎订阅