

南极泰山站多能互补微电网系统研究及实证

吕冬翔¹ 李钊¹ 王哲超² 姚旭² 魏福海² 李钊¹ 韩安军³ 卞建涛³

¹中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384;

²中国极地研究中心, 上海 200136;

³中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘要 针对南极泰山站极寒、大风、高原缺氧等极端气候条件, 设计高可靠性、高耐候性微电网系统整体架构, 根据现场使用环境, 研究并仿真计算了微电网系统的必要运行参数和安装实施方式。泰山站多能互补微电网系统研制突破了极端气候条件下太阳能和风能发电能力设计、光伏板防堆雪设计、多能互补微电网系统控制设计等关键技术, 研究设计了在无人值守条件下能够自主运行的智能控制平台, 通过并网运行与离网运行两种控制模式, 构建了高效稳定的风、光、燃、储多能互补型智能微电网系统。系统安装在南极泰山站现场进行了验证性试运行, 结果表明微电网系统的各项功能指标均能达到设计要求。南极泰山站多能互补微电网系统的验证性建设和成功试运行为我国在极地地区开展可再生能源利用起到良好的探索和示范作用。

关键词 南极 泰山站 多能互补 风能 太阳能 微电网系统

doi: 10.13679/j.jdyj.20190036

0 引言

南极洲因其特殊的地理位置和丰富的冰雪资源, 具有极高的研究意义与研究价值。近年来, 各国在南极不断建设科学考察站, 目前南极洲已有的科学考察站和野外营地总数已超过 150 个^[1]。南极拥有极其丰富的可再生资源, 其中风能与太阳能尤为突出。据美国麦克默多站观测统计, 南极麦克默多站年平均风速超 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 最高风速可以达到 $41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[2]; 由法国、意大利等欧盟国家建设的康科迪亚考察站统计显示, 南极内陆的最大光照强度超过 $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[3]。

由于人类在南极的考察活动已经对当地自然环境开始造成明显影响, 2017 年 6 月, 在北京举行的第 40 届南极条约协商会议(ATCM)上倡导

“绿色考察”, 以更好地推动南极的科研和环保工作, 因此, 各国在建设考察站时大力推广使用多能互补技术, 提高清洁能源的利用率。比利时伊丽莎白公主站是位于南极洲上的第一座“零污染”考察站, 伊丽莎白公主站北面配备有 9 座风车和超过 600 块太阳能光伏板, 可以完全实现多能互补运行。澳大利亚的斯科利尔站使用了太阳能和风能发电作为补充能源; 澳大利亚莫森站采用 3 台 300 kW 的风力发电机作为主要能源^[1,4], 传统燃油能源仅作为补充和应急供电。

自 2010 年以来, 美国麦克默多站和新西兰斯科特基地在罗斯岛风场上建设 3 台 330 kW 风力机组用于基地供电, 预期每年减少柴油消耗约 463 000 L, 减少二氧化碳排放量 1 242 t, 最终目标是依靠风能提供两座考察站的全部能量, 柴油发电机仅作为备用。到 2012 年 4 月, 麦克默多和

[收稿日期] 2019 年 7 月收到来稿, 2019 年 8 月收到修改稿

[作者简介] 吕冬翔, 男, 1987 年生。工程师, 主要研究方向为极端环境下多能互补微电网系统和临近空间无人飞行器能源系统。
E-mail: dongxianglv@163.com

斯科特站联合风力发电系统发电量达到了计划发电量的 111%，提供了斯科特站和麦克默多站(南

极洲最大的考察站)11%的能量需求。南极考察站可再生能源使用情况如表 1 所示。

表 1 南极考察站可再生能源使用情况
Table 1. Renewable energy usage at Antarctic stations

考察站隶属国家和名称	可再生能源种类	可再生能源规模	运行情况
比利时伊丽莎白公主站	风能、太阳能	9座风车、600块光伏	全年使用
美国麦克默多站	风能	3台330 kW风力涡轮机(与斯科特共用)	全年使用
新西兰斯科特站	风能	3台330 kW风力涡轮机(与麦克默多共用)	全年使用
澳大利亚莫森站	风能	大风时满足高达95%的供电需求	全年使用
日本昭和站	太阳能	辅助电源	夏季使用
韩国张保皋站	风能、太阳能	风能每年提供186 624 kWh, 太阳能每年提供31 858 kWh	全年使用
中国中山站	风能、太阳能	7组3 kW的风力发电机与80 m ² 太阳能电池板	已弃用

从表 1 可以看出,世界上的一些发达国家,包括在南极地区具有一定话语权的国家都已经在当地采用可再生能源配合传统化石能源供电的方式进行供电。

这些已经利用可再生能源进行发电的国家普遍在南极经营多年,大多都是经济发达国家,具有深厚的技术基础和经济基础,能够将大型工程机械设备运抵南极,在低温、大风等条件下的可再生能源发电领域具有深厚的技术积累。建设的超大型风机和光伏发电系统能够满足当地使用环境的要求。

我国对南极地区的可再生能源也早有布局^[5-8],在 20 世纪 90 年代就开始在南极利用可再生能源进行发电,并且已经在南极中山站和昆仑站建设了一部分光伏和风机的科研示范发电项目。但是,受到当时经济条件和技术水平制约,中山站和昆仑站的可再生能源发电系统简单,仅能够独立支持部分小功率科研设备供电,尚未达到利用可再生能源供电替代部分燃油供电的目标。

泰山站建在南极内陆伊丽莎白公主地,位于昆仑站与中山站之间,如图 1 所示。泰山站海拔 2 600 多米,气压较低^[9],但是空气含氧量相比昆仑站更适合开展营建活动。泰山站的定位是南极内陆夏季科学考察站,冬季为无人值守科研自动观测站。南极泰山站的设计指导思想为:“科技、低碳、环保、安全、人性化”。按照泰山站的设计理念,泰山站在设计的过程中总结国外优秀考察站的先进经验,吸纳国外优秀考察站的先进技术^[10-11],达到我国目前南极建站的领先

水平,能够与国外类似科考站相媲美。根据泰山站的建设定位,泰山站建成后,考虑增强考察站的自动化及高科技的研究与应用,加大清洁能源的应用比重,使之成为南极考察站中高科技与环境保护的示范站。在南极泰山站进行供电、供气、供水和供暖建设的二期建设中,中国极地研究中心开始规划可再生能源供电的使用。

根据南极的环境以及能源系统设计原则,泰山站能源系统以风能、太阳能为主要能源,满足泰山站的基本供电需求,辅以燃油作为保障,形成先进的风、光、燃、储互补型微电网系统,完成能源系统相变蓄热、电能智能管理等功能,把先进、可靠的建筑技术运用到考察站中。

根据南极泰山站多能互补微电网系统的建设安排,计划在 2018—2019 年中国第 35 次南极考察期间完成多能互补微电网系统的基本功能建设,初步具备利用风能、太阳能供电能力。然后,在 2019—2020 年,中国第 36 次南极考察期间完成多能互补微电网系统的风能、太阳能扩容增量,全部完成南极泰山站多能互补微电网系统的建设工作。2020 年南极泰山站多能互补微电网系统全部建设完成后,风能、太阳能发电将能够满足考察站大部分用电需求。

本文基于泰山站的能源状况与供电需求,设计了风-光-燃-储多能互补微电网系统,将光伏、风力和燃油发电综合利用,并设计了可靠、稳定的控制系统,采用统一的智能管理系统自动管理调配,完成泰山站的智能供电,并通过仿真和实际结果验证了设计的正确性。

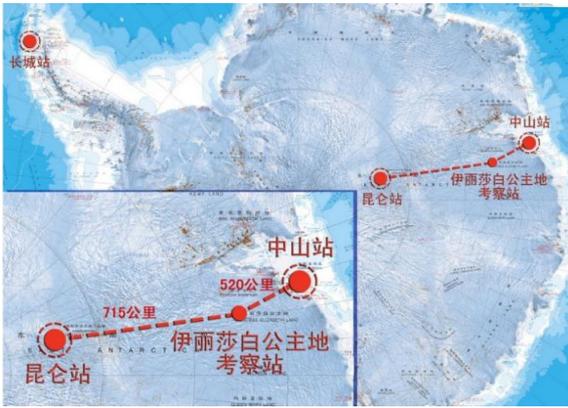


图 1 南极泰山站位置布局图

Fig.1. Location of Taishan Station in Antarctica

1 系统总体研究设计

1.1 设计背景

泰山站自建成以来,积累了多年的气象数据,包括泰山站全年的温度、湿度、风向、风速、气压等气象资料数据。图 2—图 5 分别给出了 2013—2017 年泰山站连续五年主站位置的温度、湿度、风速和风向的变化。

从多年积累的数据可以看出,泰山站常年低温干燥,降雪较少,但是风速很大,风吹雪是造成建筑和结构大量堆雪的主要因素。多年的数据积累对多能互补微电网系统设计提供了有利的数据支撑,对风机和光伏的结构设计、耐低温设计、抗风设计和防堆雪设计都是有力的支撑。

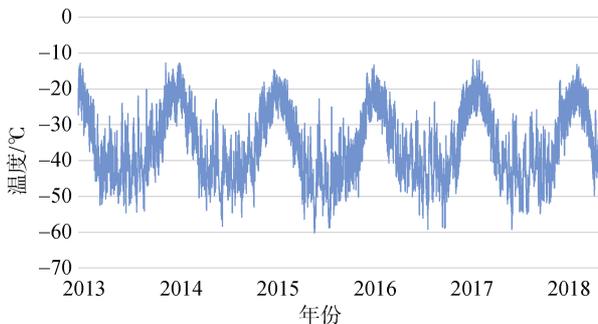


图 2 泰山站连续 5 年的温度变化

Fig.2. Temperature variation at Taishan Station for 5 years

根据南极泰山站的设计思路,泰山站拟建设成为夏季有人值守、冬季无人值守的内陆站点,根据泰山站的设备和人员用电需求,泰山站总的用电和供暖需求为:

南极泰山站多能互补微电网系统需要满足南极泰山站在每年 12 月到次年 2 月夏季有人值守期间,每日 24 小时 50 kW 的需要,在每年 3—12 月冬季无人值守期间,每日 24 小时 10 kW 的能量供给要求。

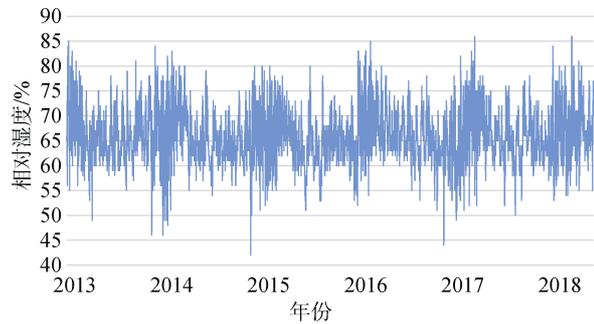


图 3 泰山站连续 5 年的湿度变化

Fig.3. Humidity variation at Taishan Station for 5 years

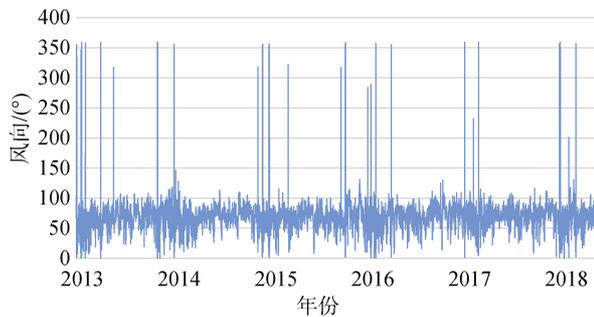


图 4 泰山站连续 5 年的风向变化

Fig.4. Wind direction variation at Taishan Station for 5 years

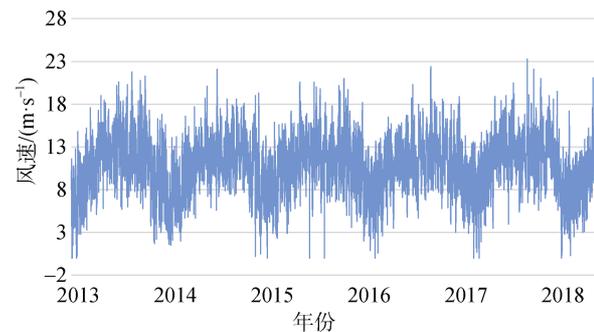


图 5 泰山站连续 5 年的风速变化

Fig.5. Wind speed variation at Taishan Station for 5 years

根据泰山站的设计思路,泰山站多能互补能源系统总共配置可再生能源系统规模 60 kW,其中,光伏发电系统配置 40 kW,风力发电系统配置 20 kW,储能电池配置 110 kWh,并配置两

台 80 kW 的柴油发电机(一备一用)作为主能源系统。

在夏季有人值守期间, 总共需要 50 kW 的连续供电, 根据可再生能源系统的规模, 综合考虑可再生能源的波动供电特点和储能电池的能量存储规模, 可以估算出可再生能源能够提供 30—40 kW 的能源, 能够满足泰山站大部分供电需要, 柴油发电机作为辅助供电和应急使用即可。冬季无人值守期间, 在风力充足的情况下, 可再生能源系统理论上能够满足 10 kW 的用电需求。

1.2 设计原则

南极泰山站微电网系统可在并网和离网两种模式下工作。在并网工作时, 可再生能源与柴油发电机同时运行, 可再生能源为负载供电, 柴油系统作为补充。同时, 可再生能源与柴油发电也可以通过微电网系统为储能电池充电。在并网工作模式下, 可再生能源和柴油发电系统互为支撑, 实现能量的双向交换。

在多能互补微电网系统出现故障时, 系统能

够通过开关断开与柴油发电机的物理连接, 从而使整个用电网络完全由柴油发电机供电。当柴油发电机出现故障或可再生能源充足的情况下, 通过开关可将柴油发电机旁路掉, 微电网系统可转为可再生能源独立供电的离网工作模式, 继续为用电网络供电。该种用电模式能够有效提高用电网络的供电可靠性, 通过采取先进的控制策略和控制手段, 可保证微电网高电能质量供电, 也可以实现两种运行模式的无缝切换。

本项目将依据以上原则和可再生能源的配置数量对泰山站多能互补微电网系统中的可再生能源发电量和微电网系统配置进行计算分析和设计。

1.3 总体设计

根据南极环境保护的要求和泰山站的能源使用情况, 泰山站的能源供给遵循尽可能多地采用光伏、风力等可再生能源发电的原则, 根据能源供给策略, 设计南极泰山站风-光-燃-储微电网系统的综合拓扑结构, 如图 6 所示。

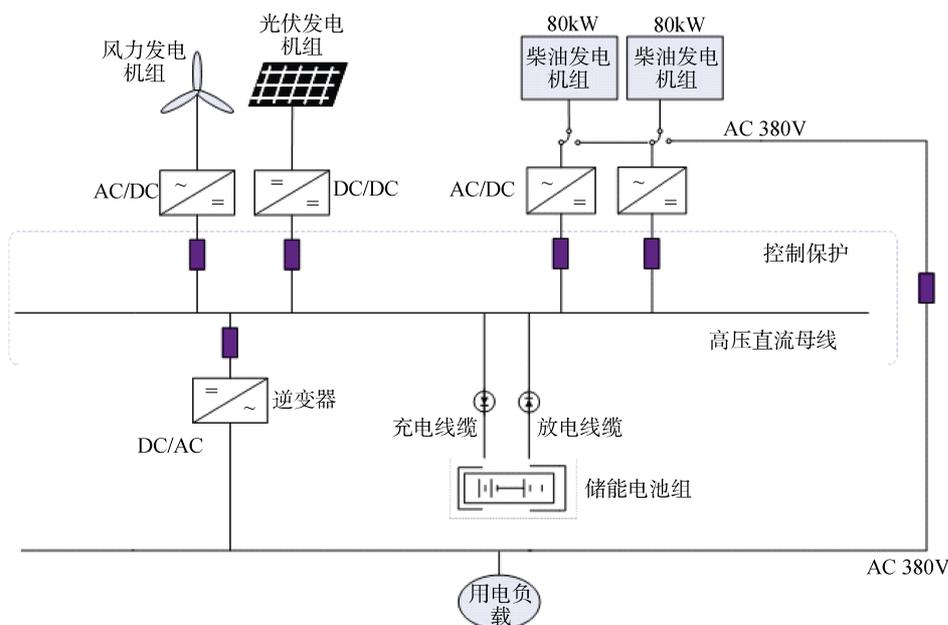


图 6 南极泰山站能源系统拓扑图

Fig.6. Topological map of energy system for Taishan Station

微电网系统运行以可再生能源发电为主, 柴油发电为补充。微电网系统供电输出为 380V/50Hz 交流电, 直流母线完成微电网系统的供配电连接, 微电网的供电母线采用 400 V 高压直流母

线, 风力、光伏、燃油等发电装置所发电力都并入微电网系统中。同时, 不同形式的发电装置都具有单独脱离母线电网的开关, 能够根据智能监测结果自主控制并网和离网工作状态。

2 分系统研究设计

2.1 光伏发电分系统设计

2.1.1 光伏最优倾角计算

由于泰山站地处伊丽莎白公主地, 夏季多为极昼, 光照十分充足, 有着丰富的太阳能资源, 而冬季多为极夜, 光照匮乏, 太阳能资源不足。根据这一特性, 光伏分系统应充分利用南极夏季的太阳能资源, 设计最优倾角, 使夏季的太阳能发电量达到最高。

对光伏发电角度的优化计算如下。

从光伏电站的日发电量预测公式为:

$$E_d(\text{kWh}) = \frac{P_{pv}}{G_{stc}} \times H \times V_b \times V_s \times V_T \times V_a \times V_r \quad (1)$$

其中, E_d (kWh): 每日发电量预测; P_{pv} : 光伏电站所用组件的总标称功率; G_{stc} : 光伏组件标定时的标准测试辐照度; H : 当日辐照量, 通过每日太阳光的照射角度和辐照能量计算得到; V_b : 双面光伏组件背面发电增益系数; V_s : 系统损耗系数, 包括线路损耗、逆变器功率损失等; V_T : 温度系数, 光伏组件发电功率受温度影响; V_a : 安装角度增益系数, 由于预测选用辐照量为水平方向, 而实际安装有一定倾角; V_r : 衰减系数, 光伏组件随时间衰减而造成的发电量损失。

冬至日为伊丽莎白地夏季光照最强的一天, 为了最大化模拟计算光伏发电量, 首先计算太阳电池的最优朝向。

太阳电池所在平面的太阳直接辐射强度计算公式为:

$$I_{dir} = SI \eta_{cbr} \eta_{wthr} \tau \cos i \quad (2)$$

式中, η_{cbr} 为太阳能电池表面简化为一个平面后其表面形状产生的效率, η_{wthr} 为天气状况产生的效率, SI 为大气外层太阳辐射强度, 它随日地实际距离变化而变化由式(3)确定, i 为太阳光与太阳电池所形成的夹角:

$$SI = SI_0 \left[\frac{1 + \varepsilon_0 \cos \left(\frac{360^\circ d_n - 4}{365} \right)}{1 - \varepsilon_0^2} \right]^2 \quad (3)$$

其中, SI_0 为太阳常数, 取值为 1 367, ε_0 为地球轨道偏心率取 1/60, d_n 为日序数。

τ 通过以下各式计算:

$$\begin{cases} AM_0 = [1229 + (641 \sin \alpha_s)^2]^{0.5} - 641 \sin \alpha_s \\ AM_h = AM_0 \frac{P_h}{P_0} \\ \tau = 0.5(e^{-0.65 AM_h} + e^{-0.095 AM_h}) \end{cases} \quad (4)$$

其中, P_0 、 P_h 、 AM_0 、 AM_h 分别为海平面、 h 高度的气压和大气质量。

通过对南极太阳方向角的计算, 确定太阳电池板北偏东 45°发电量最高, 因此, 对冬至日北偏东 45°的同一太阳电池在不同安装角度下发电情况进行了仿真计算。太阳电池发电量结果如表 2 所示。

表 2 不同安装角度下单片电池 12 月 22 日发电量仿真
Table 2. Simulation of power generation at different installation angles of monolithic battery on December 22

计算时间	太阳电池与水平面夹角/(°)	发电能量/(W·h)
12月22日	0	47.65
	10	45.02
	20	45.21
	30	45.59
	40	45.21
	50	43.95
	60	41.70
	70	38.17
	80	33.86
	90	28.86

从表 2 中可以看出, 当光伏电池板平行于水平面时, 发电效率最高, 此时, 太阳能得到了最大程度利用。

2.1.2 光伏板防堆雪设计

南极伊丽莎白公主地年积雪量为 35 mm, 并且地吹雪现象严重, 往往一场地吹雪能堆积几米高的积雪。为了防止光伏组件被积雪覆盖, 影响光电转换效率, 太阳能电池需要有防堆雪设计方案。由于南极区域被大面积积雪覆盖, 散射条件比较好, 所以选用高效双面对称结构异质结晶体硅(HIT)太阳电池片。双面双玻组件在抗隐裂、抗PID、长期老化性等方面优势明显, 发电能力比普通单晶太阳电池高出约 20%, 使用寿命更长; 同时背面发电使得太阳电池组件背面发热融雪, 防堆积。

结合表 2 所示数据, 考虑光伏板和光伏支架防堆雪的功能, 光伏安装选取北偏东方向 45°, 既能满足发电量最高, 又能满足光伏室外部分侧向迎风, 太阳能电池板采用倾斜 10°为最终安装角度, 这也符合降雪后雪水融化并通过雪水的自身重力从组件上自然滑落的条件, 防止组件堆雪。

2.1.3 光伏发电能力计算

冬至日当天, 太阳能电池铺设为正北方向 10°时, 单片太阳能电池的发电功率如图 7 所示。

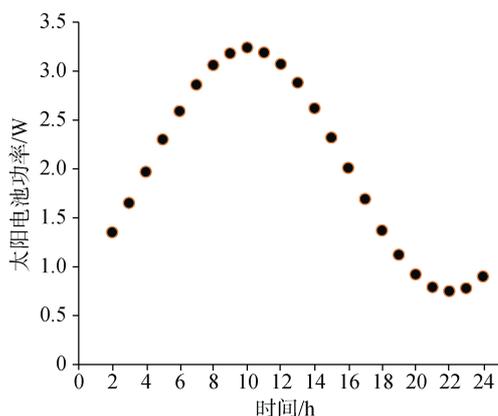


图 7 单片太阳能电池在冬至日单日发电功率
Fig.7. Power generation of a single solar cell on winter solstice

光伏电站的年发电量预测公式为:

$$E_Y(\text{kWh}) = \sum_{i=1}^{365} E_i(\text{kWh}) \quad (5)$$

根据上述计算方法, 仿真计算得泰山站如果建设 40 kWp 的光伏发电分系统, 其全年发电量

预测结果如图 8 所示:

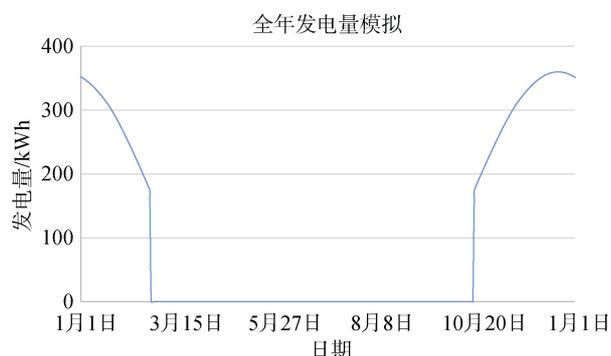


图 8 泰山站光伏能源系统全年发电量
Fig.8. Annual power generation of photovoltaic energy system at Taishan Station

综上计算, 泰山站预计光伏年发电量为 80 726 kWh, 相当于节省燃油 20.18 t(柴油平均发电油耗为 4 kWh·kg⁻¹)。

2.2 风发电分系统设计

2.2.1 泰山站风能分析

根据中国极地研究中心对南极泰山站的气象数据多年的测试和记录, 以 2017 年为例, 2017 年全年南极泰山站在 4 m 高度测得的风速情况如图 9 所示。

从图 9 中可以看出南极泰山站在夏季 12 月到次年 2 月期间, 风速较小, 在 2—12 月期间风速较大, 特别在每年 3—10 月的极夜期间, 平均风速最大。2017 年泰山站全年最大风速 22.5 m·s⁻¹, 平均风速 11.2 m·s⁻¹。

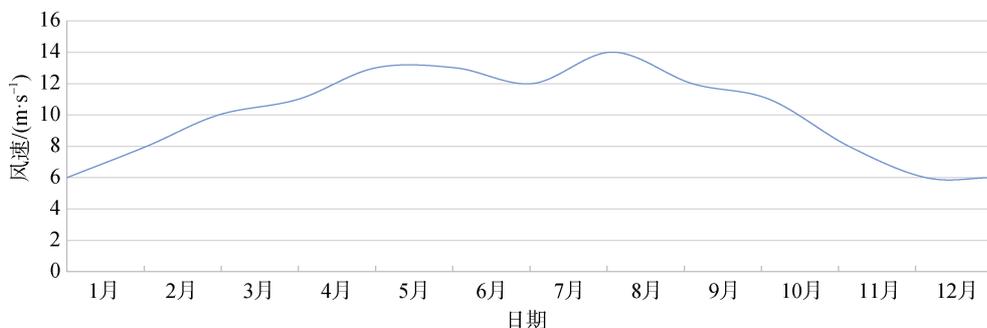


图 9 南极泰山站 2017 年全年 4 m 处风速情况
Fig.9. Wind speed at Taishan Station, 4 m from the ground in 2017

根据南极泰山站连续 5 年的风速和风向统计信息得出, 南极泰山站全年最大风速一般不超过

30 m·s⁻¹, 平均风速在 10—12 m·s⁻¹ 之间, 属于超一类风区。南极泰山站的风向全年以东风或偏东

风为主,在不同月份偶尔会出现东北风或东南风。

2.2.2 风机发电能力计算

为了能够充分利用南极丰富的风力资源,配置风力发电机用于配合冬季太阳能不足时由风能补充发电,并作为冬季极夜条件下,站点维持基本运行功能的能源保障。风机选用能够在 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速下保障自身安全和稳定性的超一类风机,避免小型风机和纯机械风机在大风情况下损坏的问题。

根据泰山站全年的风力、风向分析,采用 5 kW 风机,工作性能曲线如图 10 所示。

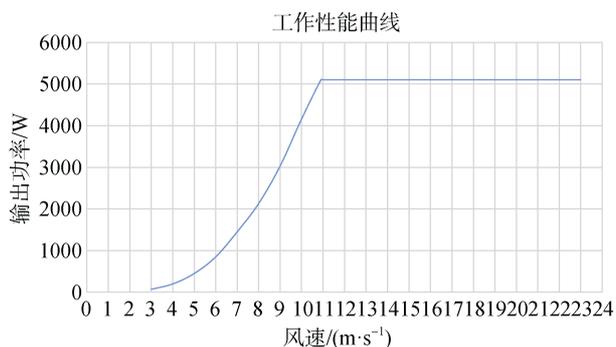


图 10 单台 5 kW 风机组工作性能曲线

Fig.10. Working performance of a single 5 kW fan

从图 10 中可以看出, 5 kW 的风机在 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的风速中工作能够达到满功率工作,当风速在 $3\text{—}11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间时,风机的发电功率呈线性上升趋势。

风机的年发电量计算公式为:

$$E_y(\text{kWh}) = \sum_{n=1}^{12} d_n \times h \times P_n \quad (6)$$

其中, d_n 为当月天数, h 为小时数, P_n 为当月风机等效功率。理论上计算 20 kW 风力发电系统全年的发电能量,计算如表 3 所示。

从表 3 中可以看到, 20 kW 风力发电系统理论发电总量为 $33\,272.00 \text{ kWh}$, 等效燃油可节省 8.3 t (柴油平均发电油耗为 $4 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2.3 控制分系统设计

2.3.1 离网运行模式

风机和光伏通过控制器向蓄电池进行充电,储能逆变器检测到直流母线电压后,设备启动运行,储能逆变器运行于离网运行模式并向负载提供交流电能,控制系统管理风光能源向蓄电池充

表 3 风力发电系统全年的发电能量

Table 3. Annual power generation of wind power generation system

风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	天数/d	系统发电量/ kWh
6.0	31	612.00
7.5	60	2 592.00
9.0	61	4 435.92
10.5	61	7 027.20
12.0	61	7 466.40
13.5	60	7 344.00
15	31	3 794.40
合计		33 272.00

电,同时将系统状态上传至监控平台。离网运行模式共有以下三种状态。

1. 状态 1: 风光资源充足时

当风光资源充足时,风光资源同时向负载供电,蓄电池处于充电模式。当电池充满后,如果光伏和风能还有多余电量,则统一给风光发电设备指令,设备降额运行,以防止电池过充。当发电功率不能满足负载所需功率时,系统运行状态切换至离网运行状态 2。当监测到储能逆变器的交流侧持续输出功率超过额定功率的 90% 时,系统切换至离网运行状态 3。

2. 状态 2: 风光资源不足时

光伏和风能发电不能满足负载使用,则风能、光伏、蓄电池同时通过储能逆变器逆变后对负载供电。当风、光、储合用都不能满足负载需求,储能电池电压小于预设阈值时,系统切换至并网运行模式,柴油机启动运行,储能逆变器运行于并网模式,柴油机通过储能逆变器向蓄电池进行充电(柴油机功率需大于负载总功率),此时电池以浮充状态运行。当风光发电满足负载使用,则系统切换至离网运行状态 1。

3. 状态 3: 风光燃储离网运行且负载增大时

若持续时间未超过阈值,系统切换至离网运行状态 1,若持续时间超过阈值,系统切换至并网运行模式,控制系统发出开机指令给柴油机,柴油机开机运行,储能逆变器切换至并网模式运行。

2.3.2 并网运行模式

柴油机组作为 $380/50\text{Hz}$ 交流电网供电能源,储能逆变器做并网运行,控制系统时判断直流母线电压、交流母线电压、频率,当系统检测到柴

油机输出电流、储能逆变器输出总电流小于储能逆变器的额定输出电流且持续时间超过设定值,同时电池电压高于预设阈值时,控制系统发出柴

油机切出、关机指令,柴油机切出,储能逆变器恢复离网运行状态 1。

整套控制系统拓扑图如图 11 所示。

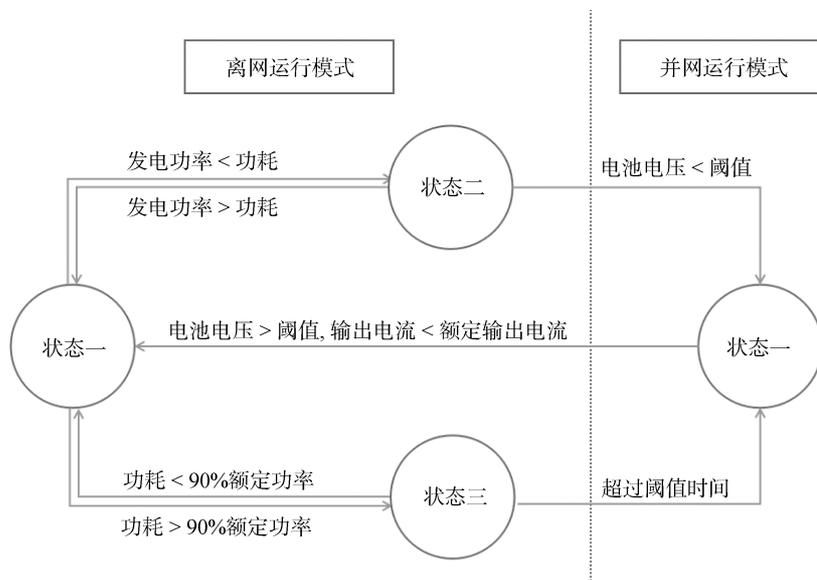


图 11 控制系统拓扑图

Fig.11. Topology diagram of control system

3 系统发电能力仿真计算

由于泰山站为夏季有人值守科考站,所以可将泰山站的用电情况分为两种情况:夏季有人值守情况和冬季无人值守两种情况。

3.1 夏季有人值守情况

在夏季有人值守期间,微电网系统将充分利用极昼资源,尽可能利用太阳能发电,电能综合利用,水、暖、电齐头并进,太阳能充足时发的多余电能用于供暖和存储,当太阳能和风能不足期间,利用柴油机补充发电,柴油机与风能、太阳能联合供电,保证站点的能源需求。

南极泰山站夏季的发电、用电模拟计算如图 12 所示。

从图 12 中可以看出,每年夏季有人值守期间,可再生能源理论发电量能够满足全天 24 小时 15 kW 的用电需求。

夏季有人值守期间,采用太阳能、风能和储能协调运行,60 天能够提供 21 600 kWh 的电量,能够基本满足站区用电需求。

3.2 冬季无人值守情况

每年的 3 月初到当年 10 月中旬,是泰山站的

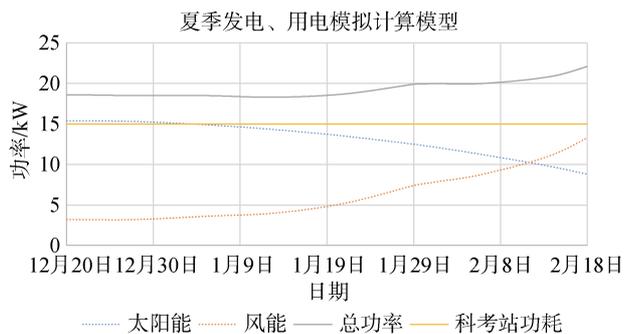


图 12 南极泰山站夏季发电量与功耗计算

Fig.12. Power generation and consumption calculation of Taishan Station in summer

冬季,冬季光伏发电量下降,因此,在太阳能不足的时间段,尽可能采用风力发电作为泰山站的能量供给来源。当光伏和风力发电都不满足能源需求,或者光伏和风能发电出现问题时,微电网系统能够通过控制系统自动切换实现燃油供电,保证泰山站的能源供给不受时段和微电网系统故障的影响。

南极泰山站冬季的发电、用电模拟计算如图 13 所示。

根据南极泰山站的太阳能风能仿真计算可以得出,在无特殊负载要求的条件下,理论上微电

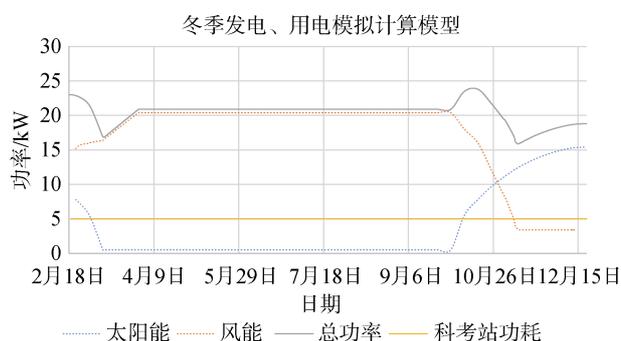


图 13 南极泰山站冬季发电量与功耗计算

Fig.13. Power generation and consumption calculation of Taishan Station in winter

网系统配置的可再生能源数量能够满足泰山站冬季无人值守时的能源需求。

4 系统验证性建设和试运行

2018—2019 年中国第 35 次南极科学考察期间,泰山站多能互补微电网系统在南极泰山站进行了验证性建设和试运行。试运行主要对多能互补微电网系统的工作特性,包括光伏、风力发电能力特性进行验证,对储能系统性能进行验证,最重要的是对全系统联合运行情况和供电能力进行检验。本次泰山站多能互补微电网系统试运行将为下一步系统扩容升级提供可靠的数据支持,积累丰富现场工程经验。泰山站验证性建设的风机和光伏分别如图 14a、b 所示。

南极泰山站多能互补微电网通过系统内部局域网将系统的实时运行状态和发电量数据上传到系统主控平台,主控平台根据控制策略对系统运行进行优化调度。微电网系统还能够通过铱星网

络将储能电池的运行状态发送到国内,实现对储能电池状态的超远程监控。

从 2019 年 1 月 14 日南极泰山站多能互补微电网系统建设完成并试运行,到 2019 年 2 月 4 日考察队离开泰山站期间,系统试运行结果如图 15 所示。



a)



b)

图 14 泰山站发电系统. a)风力发电分系统; b)光伏发电分系统

Fig.14. Power generation system of Taishan Station. a) the wind power generation subsystem; b) the photovoltaic power generation subsystem

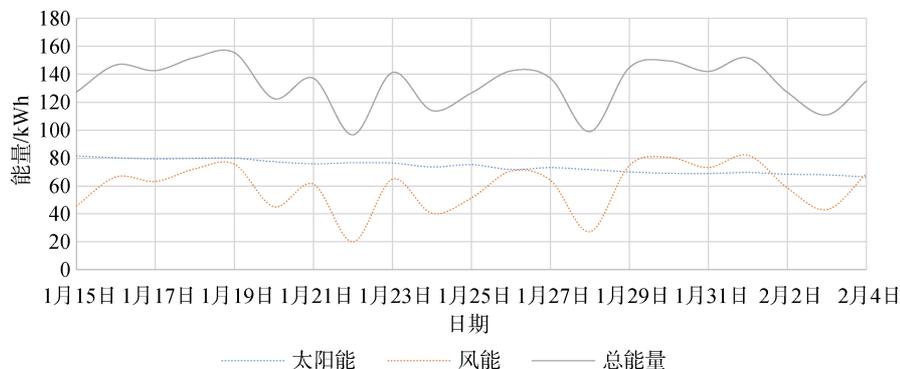


图 15 2019 年 1 月 15 日—2 月 4 日泰山站日发电量统计

Fig.15. Daily power generation of Taishan Station from January 15 to February 4, 2019

从图15中可以看出, 南极泰山站多能互补微电网系统在试运行期间发电效果良好, 光伏和风力在试运行期间, 20天累积发电约2 000 kWh, 发电能力符合设计和计算结果, 能够为站区提供稳定、可靠、持续且环保的能源供给。

5 结论

本文根据南极泰山站的历史环境数据和确定的输入参数条件, 采用仿真软件进行计算预测分析, 突破了极端气候条件下太阳能和风能发电能力设计、光伏板防堆雪设计、多能互补微电网系统控制设计等关键技术, 创新性地研究设计了在无人值守条件下能够自主运行的智能控制平台, 通过并网运行与离网运行两种控制模式, 构建了高效稳定的风、光、燃、储互补型智能微电网系统。

在我国第35次南极科学考察期间, 在泰山站完成了多能互补微电网系统的验证性运行。试运行结果表明, 系统的发电能力符合设计要求, 试运行发电量与仿真计算结果吻合较好, 系统能够为站区提供稳定、可靠、持续且环保的能源供给。

南极泰山站多能互补微电网系统的验证性建设和成功试运行为可再生能源在极地的发展应用, 实现极地能源原位获取, 就地使用起到了良好的探索和示范作用。南极泰山站多能互补微电网系统的长时运行状况, 也能够为将来提升极地地区多能互补微电网系统的技术水平提供充足数据和应用参考, 对极地可再生能源技术发展具有切实的推动作用, 为后续我国在极地推广使用可再生能源, 环保利用南极资源, 深入贯彻落实习近平总书记认识南极、保护南极、利用南极的思想, 为提升我国的国家形象, 更好地保护南极、利用南极具有重要价值。

参考文献

- 1 任飞. 南极科考站建筑的生态设计[J]. 城市建筑, 2006(7): 35-39.
- 2 KUEFFNER J H. Wind hybrid power system for Antarctica inmarsat link[C]//International Telecommunications Energy Conference. [S.l.]: IEEE, 1986: 297-298.
- 3 BOCCALETTI C, DI FELICE P, SANTINI E. Integration of renewable power systems in an Antarctic Research Station[J]. Renewable Energy, 2014, 62: 582-591.
- 4 LLANO D X, MCMAHON R A. Modelling, control and sensorless speed estimation of micro-wind turbines for deployment in Antarctica[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(3): 342-350.
- 5 何国庆. 南极长城站可再生能源利用示范研究[C]//中小型风能设备与应用. [S.l.]: [s.n.], 2016: 50-53.
- 6 席晓琴. 南极中山站风光互补供电系统设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- 7 刘磊. 极地低温环境下小型风光互补供电系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- 8 席晓琴, 窦银科, 窦若凡, 等. 南极中山站风光互补系统控制策略的研究与仿真[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(28): 72-79.
- 9 薛峰, 张占海, 周明煜, 等. 东南极大陆边缘地区夏季近地面层风场特征分析[J]. 极地研究, 2009, 21(4): 288-298.
- 10 CONTI J P. In search of the zero-emission continent[J]. Engineering & Technology, 2009, 4(21): 46-49.
- 11 SMITH Z, NEGNEVITSKY M, WANG X L, et al. Cold climate energy production[C]//2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). [S.l.]: IEEE, 2013: 1-6.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MULTI-ENERGY COMPLEMENTARY MICROGRID SYSTEM AT TAISHAN STATION, ANTARCTICA

Lü Dongxiang¹, Li Chuan¹, Wang Zhechao², Yao Xu², Wei Fuhai², Li Zhao¹,
Han Anjun³, Bian Jiantao³

¹The Eighteenth Research Institute of China Electronics Group, Tianjin 300384, China;

²Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China;

³Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract

A highly reliable and weatherproof microgrid system was designed under extreme climate conditions, including extremely cold, high winds and thin oxygen, at Taishan Station in Antarctica. The essential operating parameters and installation strategy of the multi-energy complementary microgrid system were studied and simulated using the environment of Taishan Station. The development of this system provides a breakthrough for key technologies, such as solar and wind power generation, capacity and design, under extreme climate conditions. Advances in design and operation, including snow protection and control system designs for a multi-energy complementary microgrid and an intelligent control platform that can operate autonomously, were first studied and applied. Through the use of two control modes (grid-connected and off-grid operation modes), an efficient, stable and complementary system, including wind, solar, fuel and storage, was constructed. The system was installed, debugged and tested at Taishan Station; the results showed that the system met the design requirements and calculation results and can be used as a reliable power supply for Antarctic research stations.

Key words Antarctica, Taishan Station, multi-energy complementary, wind energy, solar energy, microgrid system