

[能源管理]

面向离网型孤岛的多能互补智能微电网负荷预测与规划设计

文/施永贵¹ 张炜¹ 杨勇²

1. 厦门城市职业学院; 2. 福建中电恒盛电力科技有限公司

以海岛负荷发展需求为场景，具体分析离网型孤岛现有负荷、负荷预测与电网规划，结合远景光伏、风力和可调节负荷接入，规划运用多端口能源路由技术、多能互补关键技术和微电网智能控制策略，设计一套适合该岛屿的智能微电网能源管理系统，提高岛内配电网运行的灵活性，打造海岛智能微电网示范项目。

我国海岛数量众多，部分海岛远离陆地，能源供应困难，存在电网并网难度大、电力基建成本高、供电可靠性不稳定等问题，在一定程度上对驻岛人员的工作和生活造成影响和不便。随着新型电力和能源转型的逐步推进，全球范围内诸如风能、光伏和潮汐能等可再生能源发电将逐步推广应用，孤岛上微电网的应用是不断对可再生能源进行利用整合，所产生的电能能够为各海岛上居民、部队基地和岛屿商业提供安全可靠的绿色能源。

据悉，东南沿海海岛有较好的风能、太阳能和海洋能等可再生能源可资利用。针对海岛居民和商业的不断发展，需要一种能克服海岛特殊地理位置和恶劣自然环境的发电方式。在众多可再生能源技术开发中，光伏的利用和风能的转换是公认为最有效率和最值得开发的新能源。而柴蓄风光混合互补发电系统由风力发电转换模块、光伏发电单元、磷酸铁锂蓄电池储能充放电模块以及柴油发电机构成，能尽可能多地利用太阳能和风能，减少柴油发电机的运行，建设生态型和环保型海岛，促进我国海洋经济的发展，提高岛上居民的生活品质。因此，建设风光柴储多能互补微电网

项目来解决该岛居民和驻扎军队的生活需求已成为当务之急，同时可为开发海岛旅游资源提供有效保证。

本文以东南沿海某海岛的实际应用场景为研究对象，具体分析离网型孤岛现有负荷、负荷预测与电网规划，然后规划运用多端口能源路由技术、多能互补关键技术与岛上原有微型电源网络进行协同分析控制，实现“分布式发电”。以风电、光电为主，蓄能储备作为调节，充分利用柴油发电机组作为补充和应急，并综合地、可靠地向海岛用户提供电能。以较少的资金、资源和环境代价，换取较高的整体投资效益，提升能源转换效率。

负荷预测分析

1. 负荷现状分析

东南沿海某海岛上目前主要用电负荷可分为居民负荷、商业负荷和驻军负荷。居民负荷全部由市供电公司的柴油发电机供电；商业负荷大部分由市供电公司的柴油发电机供电，少部分通过自备柴油发电机供电；军队负荷中冰库等大型用电设备采用自备柴油发电机供电，装设光伏后，大部分负荷由

基金项目：福建省中青年骨干教师教育科研项目（JAT231248）；厦门市城市职业学院高层次人才科研启动项目（20105016, G2Q2022-7）

自身光伏及柴油发电机供电。2022年该市供电公司全年供电量约31.52万kW·h。

岛上每月负荷特性波动较大，每年7~10月为负荷高峰期，在采取严格限电措施的情况下，最高负荷一般控制在150 kW左右。电量方面，7~10月旺季全岛用电量平均约3.2万kW·h/月，主要为居民生活用电、空调设备冷藏用电和商场商业负荷；12~3月份为淡季，主要为生活用电，全岛用电量平均约1.3万kW·h/月。目前岛上旺季的最高负荷150 kW，是岛上电源不足、严格执行有序限电措施的结果。若电源供应要全部满足负荷需求，负荷将明显超过现有水平。而且随着渔业加工及旅游业等持续发展，居民生活质量的不断提高，用电负荷需求将进一步增长。

2. 近期负荷预测与电量估算

根据调查及测算，预计岛上近几年可新装空调120~180台（以下空调平均按2 kW/台算），考虑2023年新增空调35台，宾馆入住率按70%考虑，并考虑部分居民新增电器后，预计2023年夏季高峰期最高负荷预计可达300 kW，冬季负荷较现状增长较小。预计到2025年，随着岛上消费进一步升级，电热水器、空调等家用电器覆盖率将提升。在水源问题解决后，岛上预计投产日产350 t的制冰设备，用电负荷约50 kW，同时配套海水淡化装置、冷藏库等，预计2025年负荷将增大，最大用电负荷可达420 kW。

电量方面，夏季高峰期预计月用电量达7.5万kW·h，冬季预计月用电量约2.5万kW·h，全年用电量约50万kW·h。结合现状每月用电量特性及居民用电习惯，预计各月用电量比率如图1所示。

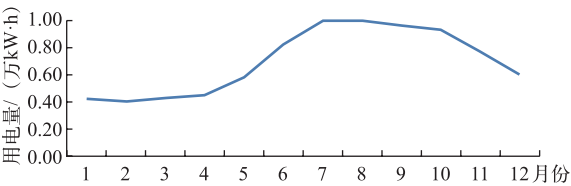


图1 各月份用电量比率图

3. 中远期负荷预测分析方法与饱和电量估算

中长期负荷预测的结果在一定程度上决定了未来规划期内电力系统的发展，中远期的负荷预测常用多种定性和定量的分析。从发达国家或地区的经验来看，电力负荷及用电量不可能无限增长，区域电

力需求经历充分发展后将趋于饱和，对应的负荷水平即为饱和负荷水平。

本文将在对岛上电力供应现状的分析的基础上，基于相对稳定、可靠的人口及可用地面积，主要使用负荷密度法及人均用电量法开展中远期及饱和负荷预测工作。

(1) 单位面积负荷密度法

以该海岛几个岛屿组的组成计算，岛屿面积约为3.2 km²，根据卫星地图估算，整体较平坦的可用建设用地面积约占全岛的30%，即0.9 km²左右。按照辖区政府除渔业外拟重点发展旅游等第三产业的规划设想，岛上可用地用途主要有居住、公共设施和道路广场三类。根据国家标准GB/750293—2014《城市电力规划规范》：居住用地单位用地负荷指标取100~400 kW/ha，公共设施用地单位用地负荷指标取300~1200 kW/ha，道路广场用地负荷指标取10 kW/ha。参考沿海岛屿的负荷密度资料，海岛各类用地比例及单位面积负荷指标取值见表1。

表1 饱和负荷时海岛各类用地及单位面积负荷指标

年份用地性质	负荷密度/ (kW/ha)	占地比例 (%)
公共设施用地	400	10
居住用地	200	20
绿地	5	30
道路广场用地	10	40

鉴于以上取值，本次预测采用应用功能单位面积负荷密度法开展了海岛负荷预测，结果见表2。

表2 海岛居民生活用电负荷预测表（负荷密度法）

年份	2023	2024	2025	2030	饱和
负荷/kW	380	480	620	1 050	2 400
电量/ (万kW·h)	42	58	80	140	480

(2) 人均生活用电量法

结合海岛以渔民生活、冷藏用电及驻军用电为主的现状，近期负荷增长主要考虑在不限电情况下用电负荷得到充分释放的发展潜力。根据电力相关部门专题开展过的饱和负荷预测研究成果，该地区饱和人均用电量8 000 kW·h，其中生活用电比重约20%，即饱和时人均生活用电量约1 600 kW·h。中远期岛上用电负荷进一步消费升级，电热水器、空调和电动大巴等普及率提高，同时旅游、制冰等产业进一步发展，岛上人均用电按1/2该地区饱和人均用电量考虑。

考虑岛上常住人口 500 人左右，夏季 6~9 月渔业、旅游等季节性人口约 2 000 人左右。按上述数据估算，至饱和时全岛用电量约 400 万 kW·h，最高负荷约 2 000 kW。

表3 海岛居民生活用电负荷预测表（人均用电量法）

年份	2023	2024	2025	2030	饱和
负荷/kW	320	400	450	800	2 000
电量/万kW·h	36	48	60	110	400

综合两种方法预测结果，根据海岛社会经济历史现状以及发展趋势，提出该海岛电力市场需求方案，远景最高负荷取 2 000~24 00 kW。考虑到海岛开发规划尚未定制，负荷发展还存在较多不定因素，本阶段居民生活用电采用方案 1 作为推荐方案。

智能微电网规划设计

根据上述负荷预测及电力电量平衡，结合本岛自然资源和实际风、光资源情况，新增电源主要考虑风力发电和光伏发电两种，柴油发电机只作为应急备用电源。考虑到岛屿风资源情况较好，而湿气、盐雾较重，电源装机以风力发电为主，光伏发电为辅。为了适应近中期的负荷发展需要和用电需求，本期孤岛型多能互补智能微电网项目建设规模为拟建设 300 kW 风电机组（3×100 kW）、200 kW 太阳能光伏发电（远景 500 kW）、500 kW 柴油发电机（2×250 kW 应急备用）、300 kW/2h 蓄电储能系统。

1. 微电网系统架构设计

本次设计的 200 kW 光伏发电系统、300 kW 风力发电系统以 300 kW/600 kW·h 储能系统采用直流接入通过双向变流器接入原有的 380 V 电气系统，新建的微电网通过多端口能源路由器与岛上原有微型电力网络进行互联，如图 2 所示。

设计将规划在储能系统中考虑配置 1 套光纤通信交换机和 1 套微电网能量管理系统，将采用组柜形式部署。通信交换机将光伏、储能和风机系统等信息汇总实现能源数据交互。

能量管理系统是微电网运行的控制核心，主要完成光伏系统、储能系统等数据采集和处理的信息获取，以及对分布式光伏、风力和储能的实时管理，同时进行系统策略运行功能。对于原有的微电

网的能源处理接口和功能，需要通过微电网能量管理系统进行协调控制，因此将对原系统进行接口和功能改造升级。

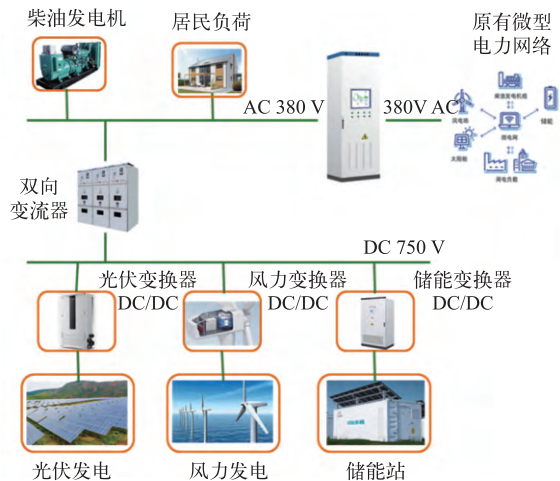


图2 智能微电网系统规划设计图

1.1 离网型微电网能源管理系统设计

本次设计的离网型孤岛微电网系统将采用“分层分级、协调控制”的原则进行，如图 2 所示。系统可分为：现场控制层（现场控制终端设备）—微电网控制层（微电网协调控制器）—配网微网协同控制层（调度系统）的三层架构。

现场控制层主要完成微电网组成的分布式数据监测和能源本地控制，本设计主要包括光伏、风机和储能直流变换器、双向变换器、柴油发电机配电终端以及多端口能量路由器等设备。

微电网控制层主要包括微电网协调控制器等设备，在微网运行时通过对各微源的控制模式及控制参数进行设置，自动运行微电网实时控制策略，对微网内的光伏、风机和储能系统进行统一实时协调控制，保证微网稳定运行。

配网微网协同控制层即供电公司调度系统，基于预设的各种控制策略实现各种能源的综合优化，保证整个微电网系统的稳定经济运行。

本项目在微电网控制层配置一套微电网协调控制器，通过光纤通道实现与光伏、风机、储能系统和柴油发电机的数据交互。微电网可通过微电网协调控制器对微电网内的各单元设备进行监控，接受市供电公司调度系统的指令。并基于岛上居民负荷与驻岛军队负荷情况，根据给定的运行模式和参考指令，控制各个关键设备协调工作的功能，实现智

能微电网与现有电源网络间系统运行模式的平滑切换和发生交流故障时的协同响应。

1.2 智能微电网系统硬件配置

智能微电网能源管理系统中分布式能源监测的设备主要包括光伏发电、风力发电、储能、多端口能量路由器以及分布式能源配备的环境监测装置等。

系统硬件装置采用落地柜部署在储能系统配置场所下，通过光纤网络与交换机实现数据交互。管理系统配置含监控主机、工作台等硬件设备和数据采集与信息交互、优化控制和调节等软件功能。具备采集接入微电网系统关键控制点的电压、电流、开关状态以及关键设备运行状态，采取快速判据确定微电网关键点及微电源的运行模式。

2. 智能微电网运行与控制

2.1 微电网控制策略

本次设计的海岛微电网系统为离网型孤岛系统，需要由储能和柴油发电机作为组网电源，储能容量充裕时，利用储能作为主组网电源维持海岛孤网的频率和电压稳定。当储能电力不足时，由柴油发电机作为系统组网电源，维持海岛孤网的频率和电压稳定。

控制策略将设定一个功率净值 K ，当功率净值 $K > 0$ 即可再生能源出力过剩时，可接入光伏、风力等发电对储能系统提供电能，储能系统将处于充电状态，而当功率净值 $K > 0$ 时光伏、风力等发电出力满足负荷需求，那么储能将处于充电状态。控制策略如图3所示。

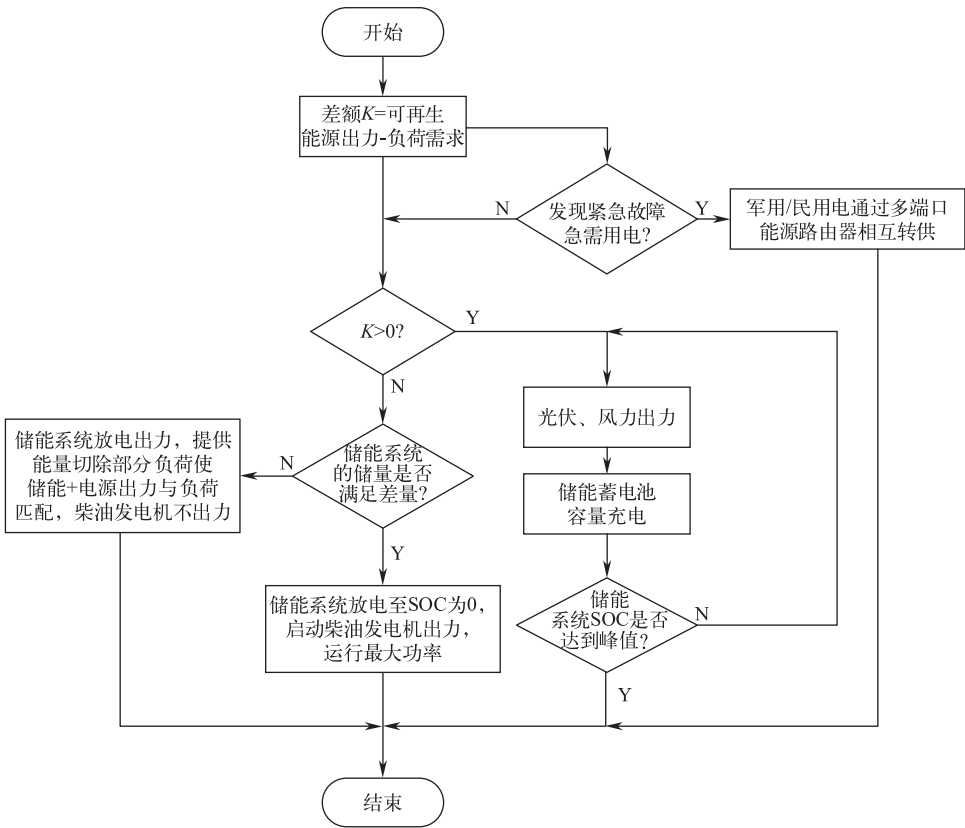


图3 储能调节的控制策略图

储能系统采用软充电策略，在一定剩余电量SOC值范围内是可以转换充放电的模式。当岛上光伏、风能等输入能源出力无法满足负荷需求时，若储能装置在完全放电到达剩余电量最低值的能量满足负荷差值需求，那么储能系统将放电。若储能系统蓄电池容量未充满，需控制风机、光伏出力进行

充电。若蓄电池已充满，需调整风机、光伏出力，使电源输出与负荷匹配。若储能系统蓄电池有可用存量电量，可通过储能系统供电，需切除部分负荷使储能+电源出力与负荷匹配。若储能系统蓄电池无可用存量电量，需切除部分负荷使电源输出与负荷匹配或启用柴油发电机供电。

2.2 智能微电网控制主要功能

(1) 数据采集和处理

主要包括对所有受控设备的电流、功率、数字电能数据等信息量进行采集和处理。对所采集的电压、电流和主变压器温度等进行判断，若有越限，发出告警信号。

(2) 光伏发电监控

对光伏发电的实时运行信息、故障及报警信息进行监测，并实现远程的光伏发电系统的启、停、功率调节及相关操作与控制。至少显示下列信息：光伏发电系统当前的功率、日发电量、总发电量、光辐照度、光伏板温度、光伏板直流端电压和电流等，能够显示实时发电功率曲线及功率预测曲线。

(3) 风力发电监控

对风力发电机的实时运行信息、故障及报警信息进行监测，并实现远程的风力发电系统的启停及相关操作与控制。至少显示下列信息：风力发电系统当前的功率、日发电量、总发电量、风向和风速等，能够显示实时发电功率曲线及功率预测曲线。

(4) 储能监控

储能电池实时运行信息的监控：如对单节电池电压、预估性能和报警信息进行全面监测，同时对储能系统进行全方位统计和分析。对于处于PQ模式运行的储能系统，可通过监控系统对电池充放电时间、充放电功率和无功进行遥调。通过监控系统可单独对特定支路的电池进行诊断和维护。

(5) 环境监测

集成环境监测功能主要包括：光辐照度、风速、风向、室外温湿度和室内温湿度等，并实现太阳能、风能的发电量预测。

(6) 电能计量

对智能微电网系统中的发电单元、储能单元及负荷进行准确的计量，用于营销、统计与分析。主要包括：分布式电源发电量、储能系统发电量和负荷侧的计量、有功功率和系统效率等。

结束语

本文设计的离网型海岛风光柴储微网项目系统

是通过实际海岛负荷发展的需求，运用了单位面积负荷密度法对现有海岛场景进行了负荷预测，有效分析了孤岛中现状、远景的实际需求，结合远景光伏、可调节负荷接入，构建交直流配电网，规划设计了一套适合该岛屿的智能微电网能源管理系统，提高岛内配电网运行的灵活性。

这将是离网型孤岛在开发清洁能源，调整现有能源结构的样例，可提高供电、供水可靠性，改善居民生活条件，可打造海岛微电网示范项目效应，不仅解决岛上居民和驻军的用电、用水的难题，而且作为绿色电能，有利于缓解台山岛供电部门的环境保护压力，促进地区经济的持续快速发展，同时还可以带动岛屿旅游业的发展，促进海岛经济的发展。**EA**

(收稿日期：2024-04-22)

参考文献

- [1] 张蕊,王程,王海云,等.主动支撑电网频率的园区多能微网优化运行[J].中国电机工程学报,2023,43(3):889-904.
- [2] 赵剑波,王蕾.“十四五”构建以新能源为主体的新型电力系统[J].中国能源,2021,43(5):17-21.
- [3] 汤易,藏玉清,钟磊,等.沿海可开发岛屿供电方式研究[J].浙江电力,2021,40(4):17-24.
- [4] Mohammad, Ghiasi. Detailed study multi-objective optimization and design of an AC-DC smart microgrid with hybrid renewable energy resources[J]. Energy, 2019, 169(15): 496-507.
- [5] 詹政东.海岛型微电网系统规划与运行控制研究[D].北京:北方工业大学,2023.
- [6] N.Salehi, H.Martínez-García, G.Velasco-Quezada, Jetal. A comprehensive review of control strategies and optimization methods for individual and community microgrids[J]. IEEE Access, 2022(10): 15935-15955.