

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181584

远洋海岛群可再生能源消纳装置定容研究

谭爱国^{1,2,3}, 何志恒^{1,4}, 王传启², 杨飞鹏¹, 李正天¹, 林湘宁¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074;
2. 天津凯发电气股份有限公司, 天津 300392; 3. 湖北民族大学 信息工程学院, 湖北 恩施 445000;
4. 中欧清洁与可再生能源学院(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 远洋海岛所在海域风、光、波浪能等可再生能源资源丰富, 周边暗礁、沙洲等无人岛礁密布, 浅水礁盘宽阔。若能协调开发岛群资源, 实现优势互补, 将为远洋海岛发展提供强大助力。着眼远洋海岛未来发展需要, 引入区分岛屿功能定位、能量联动、多岛联合发展的创新发展模式, 可为远洋海岛发展提供多重物资能量支撑。在资源岛支撑负荷中心岛物资能量需求的模式下, 对资源岛利用制淡装置和蓄电池储能装置经济消纳可再生能源进行了容量配置研究, 并利用寻优算法得出最优容量配置方案。在总成本最小的情况下可实现充分利用资源岛可再生能源且能较好地满足负荷中心岛物资能量需求。

关键词: 远洋海岛群; 资源岛; 综合能量系统; 定容

Research on capacity configuration of renewable energy dissipation device for pelagic clustering islands

TAN Aiguo^{1,2,3}, HE Zhiheng^{1,4}, WANG Chuanqi², YANG Feipeng¹, LI Zhengtian¹, LIN Xiangning¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Tianjin Keyvia Electric Co., Ltd., Tianjin 300392, China; 3. School of Information Engineering, Hubei University for Nationalities, Enshi 445000, China; 4. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Pelagic clustering islands are rich in renewable energy resources such as wind energy, solar energy, and wave energy, and are surrounded by uninhabited reefs and sandbars where shallow reefs are wide. Coordinating the development of island resources to achieve complementary advantages, it will provide strong support for the development of pelagic clustering islands. This paper focuses on the future development of pelagic clustering islands, and introduces an innovative development model that distinguishes island functional orientation, achieves energy linkage, and multi-island joint development to provide material and energy support for the development. In the model of resource islands supporting the energy demand of load center islands, the capacity configuration of resource islands seawater desalination devices and accumulators that economically dissipate renewable energy is studied, and the optimal capacity is obtained using the optimization algorithm. It can realize a full use of renewable resources in resource islands and mostly meet material and energy requirements of load center islands under the minimum total cost.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51537003).

Key words: pelagic clustering islands; resource islands; integrated energy supply system; capacity configuration

0 引言

远洋海岛由于远离大陆, 长期以来, 其电力供应主要依靠柴油机发电。若能充分开发和利用海岛上丰富的风能、太阳能及海洋能(如潮汐能、波浪能、

海流能等)可实现海岛能源清洁化供给和可持续发展^[1-3]。然而, 在单个海岛上推进负荷、基础设施建设的同时, 受岛体面积小的影响, 无法再同时布置充足的可再生能源发电装置实现资源自持。因此, 结合远洋海岛特点, 开创适合远洋海岛地区可再生能源开发利用新模式非常必要。

远洋海岛通常呈群岛分布, 周边无人岛礁密

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51537003)

布, 浅水礁盘宽阔^[4]。若在负荷集中的负荷中心岛周边因地制宜地开发利用无人岛礁上可再生能源, 可有效解决远洋海岛可再生能源规模化利用难的困局。这些可再生能源资源丰富的无人岛礁可称之为资源岛^[5]。目前, 资源岛可再生能源消纳方式主要有两类^[6-7]: 一类是就地消纳; 一类是外送消纳^[8]。

考虑到实际情况中受地理因素和政治因素的影响, 在远洋海岛间不能架设海底电缆或架空线路的情况相对普遍。资源岛由于不具备电能实时外送通道, 可再生能源发出的电能只能通过就地消纳。消纳装置的选型、定容和工作特性对可再生能源发电的消纳效果有着直接影响^[9-10]。海水淡化装置工作方式灵活可调, 蓄电池储能装置具有较好的功率吸纳和电能储备能力, 是适合消纳资源岛可再生能源发电的理想消纳装置^[11]。同时, 资源岛生产的淡水和蓄电池储备的电能最终需要运送给负荷中心岛满足其使用。因此, 资源岛制淡装置和蓄电池储能装置的容量不能盲目而为, 既需要考虑有效消纳资源岛可再生能源发出的电能, 也需要考虑负荷中心岛的用水、用电需求。

随着分布式电源发展, 目前已有大量学者针对微网中设备容量配置的问题展开了研究。文献[12-13]在考虑了不确定性、环境因素、时序特性等信息的基础上, 利用智能算法对分布式电源进行了容量规划研究。文献[14]对含风、光、储联合发电和含海水淡化装置的独立微网, 采用固定的逐时控制策略, 对系统进行了建模和优化配置。文献[15]根据淡水需求及海水淡化系统的特点, 综合考虑系统运行的经济性及环境效益, 提出了协调海水淡化负荷、蓄电池及柴油发电机运行的功率分配策略和含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网多目标容量

优化配置模型。文献[16-17]以含储能装置和制淡负荷的风/光/柴/储联合发电系统为对象, 建立了综合考虑系统可靠性、寿命周期、可再生能源利用率和污染物排放等因素的优化模型, 以经济性最优为目标, 求取电源和储能装置最佳容量配置方案。文献[18]对含风/光/柴/储的独立微网, 基于柴油发电机和储能系统不同控制方法组合而成的多种控制策略建立容量优化配置模型, 需求经济性最优兼顾环境效益的最优配置方案。文献[19]从风、光、储混合系统经济性角度出发, 发电、储能隶属不同利益主体, 提出一种基于博弈论思想的规划模型, 并对 5 种模式进行研究, 得出不同组合的优化配置方案。以上研究从不同角度建立了微网内电源、储能的容量优化配置方案, 对装置定容研究具有重要意义, 但容量配置更侧重于从电源侧考虑问题, 从全局角度考虑问题少, 针对海岛群的资源特性和物资能量需求特点开展的容量配置研究也并未涉及。

本文以资源岛与负荷中心岛不具备电能实时外送通道情况为场景, 围绕资源岛利用制淡装置和蓄电池储能装置联合消纳资源岛可再生能源, 基于物资能量需求订单模式, 提出了可有效消纳可再生能源发电的功率分配策略, 建立了极大化消纳资源岛可再生能源和满足负荷中心岛物资能量需求相统一的经济性目标函数, 以总成本最小的容量配置方案作为最佳配置方案。

1 远洋海岛综合能量供给系统场景

1.1 场景设定

远洋海岛群综合能量供给系统框图见图 1, 结合图 1 对研究场景设定如下。

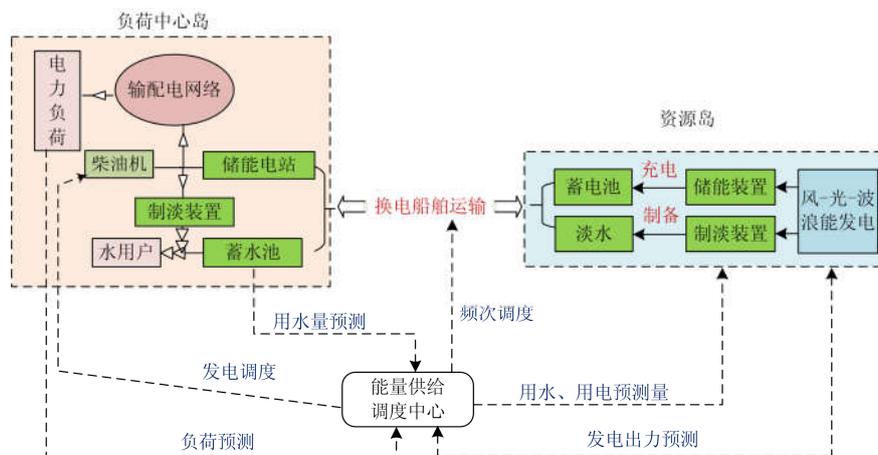


图 1 远洋海岛群综合能量供给系统

Fig. 1 Integrated energy supply system for pelagic clustering islands

负荷中心岛配有储能电站、制淡装置、蓄水池和柴油机。新开发资源岛与负荷中心岛之间不架设海底电缆和架空线路, 资源岛上使用海水淡化装置和蓄电池储能装置消纳可再生能源, 制备的淡水和充满电的蓄电池通过以电能为动力的换电船舶转运至负荷中心岛。若资源岛生产的物资能量不能满足订单用水和用电需求, 负荷中心岛根据需要开启岛上自备柴油机供电和制淡。

在海岛群微网实际运行过程中, 资源岛消纳装置的容量配置面临的问题主要有: 一方面资源岛可再生能源出力不断变化, 消纳装置需要有较好的功率跟随能力; 同时, 资源岛作为物资能量生产基地, 其最终目的是为负荷中心岛提供物资能量支撑, 而负荷中心岛物资能量需求也是处于动态变化之中。另外, 负荷中心岛和资源岛时空分割, 物资能量不能实时外送, 时空因素也需加以考虑。

本文将资源岛和负荷中心岛归为同一利益主体, 为了更好地匹配负荷中心岛物资能量需求和克服时空分割带来的影响, 本文采用的解决方案是: 负荷中心岛将每日淡水、电能的需求通过订单形式发送给资源岛, 资源岛根据淡水和电能需求订单进行生产制备。在最大化消纳资源岛可再生能源的基础上, 基于负荷中心岛物资能量订单需求, 考虑投资成本、运行成本、运输成本和柴油机补充发电成本, 以总成本最小为目标, 对资源岛消纳装置进行优化配置。

1.2 用水需求订单和用电需求订单生成方式

制定某日用水、用电需求订单前需要对该日的用水、用电情况进行预测, 本文采用负荷中心岛全年用水量、用电量历史曲线作为预测曲线。

设定负荷中心岛在 T 日 t 时将第 $T+2$ 日用水、用电需求以订单形式发送给资源岛, 每日只发送一次订单。资源岛在 T 日 t 时接到订单信息后立即进行淡水和电能制备, 在 $T+1$ 日 t 时完成订单生产任务。换电船舶在 $T+1$ 日 t 时随即将资源岛生产的物资能量运往负荷中心岛供负荷中心岛 $T+2$ 日使用, 换电船舶每日在岛间往返运输一次。

2 主成分分析原理

消纳装置的能量分配策略以及淡水和电能生产的优先级对消纳装置的容量配置有着重要影响。

物资能量优先级考虑: 在订单需求范围内, 优先考虑制淡, 其次考虑用电需求。资源岛在满足用水需求订单生产任务之后, 多余的电能尽可能用来给蓄电池充电。若蓄电池消纳能力已达到上限仍有多余的电能, 则多余的电能继续用于制淡。

考虑到资源岛除换电船舶外无本地日常负荷, 全年绝大多数可再生能源发电功率可用于淡水生产和蓄电池充电。定义资源岛可再生能源等效发电功率为 $P_{\text{net}}(t)$ (即扣除船舶充电需求后的功率)。负荷中心岛每日用水需求量为 M_w 吨 (为方便对比, 将淡水需求量转换为电能需求量, 若电转水的效率为 k_1 , 则 M_w 吨水需耗电量为 $Q_w = k_1 M_w$); 用电需求为 Q_e kW·h, 蓄电池放电深度为 α_1 。设 N_1 为资源岛制淡装置台数; $n_1(t)$ 为第 t 小时开启的制淡装置的台数; P_1 为单台制淡装置的额定功率, 定义第 t 小时制淡装置总功率为 $P_1(t)$, 且有 $0 \leq P_1(t) \leq N_1 P_1$ 。设 N_2 为资源岛蓄电池的个数; $n_2(t)$ 为第 t 小时处于充电状态的蓄电池个数; P_2 为单个蓄电池的最大充电功率, 定义第 t 小时蓄电池组总充电功率为 $P_2(t)$, 且有 $0 \leq P_2(t) \leq N_2 P_2$; 同时, 定义 E_2 为单个蓄电池额定容量, 各蓄电池在资源岛上充电过程中的初始 SOC 为最小荷电状态 S_{min} 。由于 P_1 和 P_2 为已知量, 因此定容问题的实质即为优化 N_1 和 N_2 的取值。

功率分配策略: $t=0$ 时刻资源岛接收到订单后, 对资源岛可再生能源净功率 $P_{\text{net}}(t)$ 与制淡装置总功率 $P_1(t)$ 进行比较, 存在如下几种情况。

情况 1: 可再生能源净功率在制淡负荷功率的上、下限之间, 即 $0 \leq P_{\text{net}}(t) \leq N_1 P_1$ 。

根据拟定的优先级方案, 应优先满足用水订单需求。根据可再生能源出力情况可确定, 此时制淡装置开启的台数 $n_1(t)$ 为

$$n_1(t) = \left\lceil \frac{P_{\text{net}}(t)}{P_1} \right\rceil, \quad 0 \leq n_1(t) \leq N_1 \quad (1)$$

式中, “ $\lceil \cdot \rceil$ ”表示向上取整。

此时, 制淡装置的功率为

$$P_1(t) = P_{\text{net}}(t) \quad (2)$$

处于充电状态的蓄电池数量和充电功率为 0。

$$n_2(t) = 0 \quad (3)$$

$$P_2(t) = 0 \quad (4)$$

情况 2: 可再生能源净功率大于制淡负荷功率上限, 即 $P_{\text{net}}(t) \geq N_1 P_1$ 。

为保证优先制淡, 制淡装置按功率上限运行, 此时可开启制淡装置数量 $n_1(t)$ 为

$$n_1(t) = N_1 \quad (5)$$

制淡装置的功率为

$$P_1(t) = N_1 P_1 \quad (6)$$

还有多余的净功率可给蓄电池充电, 蓄电池充电功率为

$$P_2(t) = P_{\text{net}}(t) - P_1(t) \quad (7)$$

处于充电状态的蓄电池数量为

$$n_2(t) = \lceil (P_{\text{net}}(t) - P_1(t)) / P_2 \rceil, 0 \leq n_2(t) \leq N_2 \quad (8)$$

截止到 t 时刻, 制淡装置制淡耗电量 $Q_1(t)$ 与淡水产量 $M_1(t)$ 分别可表示为

$$Q_1(t) = \int_0^t P_1(t) dt \quad (9)$$

$$M_1(t) = \frac{1}{k_1} Q_1(t) \quad (10)$$

截止到 t 时刻, 蓄电池组总充电电量为

$$Q_2(t) = \min \left(\int_0^t P_2(t) dt, (S_{\text{max}} - S_{\text{min}}) E_2 \right) \quad (11)$$

式中, S_{max} 为蓄电池最大荷电状态。

如果在 $t = t_0$, $t_0 \in [0, 24]$ 时刻有 $M_1(t_0) = M_w$, 即制淡装置完成淡水订单生产。同时, 截至 $t = t_0$ 时刻, 若蓄电池仍存在可充电空间, 则从 $t > t_0$ 开始, 淡水制备和蓄电池充电的优先级进行调换, 这时可再生能源发电功率优先给蓄电池充电, 保证负荷中心岛对蓄电池的订单需求。

情况 3: 若在完成淡水需求订单后, 可再生能源净功率在蓄电池充电功率的上、下限之间, 即 $0 \leq P_{\text{net}}(t) \leq N_2 P_2$ 。

需根据可再生能源出力情况确定蓄电池充电功率, 此时蓄电池充电数量 $n_2(t)$ 为

$$n_2(t) = \left\lceil \frac{P_{\text{net}}(t)}{P_2} \right\rceil, 0 \leq n_2(t) \leq N_2 \quad (12)$$

此时蓄电池的充电总功率为

$$P_2(t) = P_{\text{net}}(t) \quad (13)$$

制淡装置开启数量、功率分别为

$$n_1(t) = 0 \quad (14)$$

$$P_1(t) = 0 \quad (15)$$

情况 4: 若在完成淡水需求订单后, 可再生能源净功率大于蓄电池充电上限, 即 $P_{\text{net}}(t) \geq N_2 P_2$ 。

为保证优先给蓄电池充电, 充电功率按上限运行。此时蓄电池充电数量 $n_2(t)$ 为

$$n_2(t) = N_2 \quad (16)$$

此时蓄电池的充电功率为

$$P_2(t) = N_2 P_2 \quad (17)$$

多余的净功率继续用于制淡装置制淡, 以保证可再生能源全部消纳。

此时, 制淡装置功率为

$$P_1(t) = P_{\text{net}}(t) - P_2(t) \quad (18)$$

制淡装置开启数量为

$$n_1(t) = \lceil (P_{\text{net}}(t) - P_2(t)) / P_1 \rceil, 0 \leq n_1(t) \leq N_1 \quad (19)$$

上述 4 种情况, 均为在蓄电池未达到最大荷电状态之前的功率分配情况。当蓄电池 SOC 达到最大值 S_{max} 后, 则蓄电池已无法再继续充电, 此时有 $P_2(t) = 0$, 剩余新能源发电全部用于制淡装置制淡, 而此时可开启制淡装置数量 $n_1(t)$ 完全取决于可再生能源净功率 $P_{\text{net}}(t)$ 。

当 $t=24$ 时, 一个生产周期结束, 制淡装置全天制淡耗电量及该日淡水制备量分别为

$$Q_1(t) = \int_0^{24} P_1(t) dt \quad (20)$$

$$M_1(t) = \frac{1}{k_1} Q_1 = \frac{1}{k_1} \int_0^{24} P_1(t) dt \quad (21)$$

该日蓄电池充电量为

$$Q_2 = \min \left(\int_0^{24} P_2(t) dt, (S_{\text{max}} - S_{\text{min}}) E_2 \right) \quad (22)$$

3 消纳装置容量配置优化模型

3.1 目标函数

构建规划期内的年均总成本指标 C_{total} , 如式(23)所示, 优化目标为总体成本最小。

$$C_{\text{total}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{op}} + C_{\text{ens}} + C_{\text{tra}} \quad (23)$$

式中: C_{inv} 为消纳装置等年值设备投资成本; C_{op} 为消纳装置年均运行成本; C_{ens} 为柴油机补充能量短缺的年发电成本; C_{tra} 为资源岛生产的淡水和充电后的蓄电池运往负荷中心岛的年运输成本。

3.2 等年值设备投资成本

制淡装置、蓄电池等年值设备投资成本计算公式为

$$C_{\text{inv}} = (C_{\text{invw}} + C_{\text{invb}}) \cdot f_{\text{cr}} \quad (24)$$

式中: C_{invw} 、 C_{invb} 分别表示规划期内制淡装置及蓄电池的投资成本; f_{cr} 为折现系数, $f_{\text{cr}} = \frac{r(1+r)^{L_r}}{(1+r)^{L_r} - 1}$; r 为折现率, 本文取 6.7%; L_r 为系统全寿命运行年限, 本文取 20 年。

规划期内制淡装置及蓄电池的投资成本的具体计算公式分别为

$$C_{\text{invw}} = C_w \cdot N_1 \quad (25)$$

$$C_{\text{invb}} = C_b \cdot N_2 \quad (26)$$

式中: C_w 和 C_b 分别表示制淡装置和蓄电池的单价; N_1 和 N_2 分别表示资源岛制淡装置和蓄电池的拟配置数量。

3.3 消纳装置年均运行成本

可再生能源消纳装置年均运行成本包括资源

岛上的制淡装置和蓄电池充电的运行成本。

$$C_{op} = C_{opw} + C_{opb} \quad (27)$$

式中, C_{opw} 和 C_{opb} 分别表示制淡装置和蓄电池的年平均运行成本。各消纳装置年平均运行成本的具体计算公式为

$$C_{opw} = N_1 \cdot f(P_1) \quad (28)$$

$$C_{opb} = N_2 \cdot f(P_2) \quad (29)$$

式中: $f(P_1)$ 表示单台制淡装置年运行费用; $f(P_2)$ 表示单个蓄电池年运行费用系数。

3.4 负荷中心岛柴油机补充发电成本

当资源岛可再生能源出力不足或资源岛消纳装置生产能力不足而不能满足负荷中心岛用水用电订单要求时, 需要负荷中心岛的柴油发电机补充发电。柴油发电会排放大量的氮氧化物等污染气体, 污染物的排放需要征收污染物排放及治理费用。可通过计算柴油机每千瓦时发电所排放的污染物种类和数量, 得出单位电量的污染物惩罚系数^[20]为

$$c_{pl} = \sum_{i=1}^m X_i V_i \quad (30)$$

式中: X_i 为单位质量第 i 种污染物的排放及治理费用; V_i 为单位质量第 i 种污染物排放系数。具体系数如表 1 所示。

表 1 柴油发电污染物排放治理费用和排放系数

Table 1 Diesel power pollution emission control costs and emission factors

污染物种类	治理费用/(元/kg)	排放系数/(g/kW·h)
SO ₂	5.25	0.464
NO _x	7.50	4.331
CO ₂	0.25	242.040
CO	0.96	2.320

柴油机补充短缺能量的运行成本为

$$C_{ens} = \sum_{T=1}^{365} (c_{pl} + c_d) Q_d(T) \quad (31)$$

式中: c_d 为每 kWh 电能消耗的柴油价格, 可通过柴油发电机燃油消耗率乘以远洋海岛到岸柴油价格求得; $Q_d(T)$ 为柴油发电机每日补充发电量。

3.5 年运输成本

资源岛生产的淡水和充满电的蓄电池需通过换电船舶运送到负荷中心岛, 该运输费用为

$$C_{tra} = \sum_{T=1}^{365} (\varepsilon_w M_1(T) + \varepsilon_b Q_2(T)) L \quad (32)$$

式中: ε_w 表示每吨水的货运成本系数; ε_b 表示单位电量蓄电池货运成本系数; L 表示运输距离。

3.6 约束条件

(1) 消纳装置功率约束

为最大化利用资源岛上的新能源, 资源岛制淡装置和蓄电池的总功率应大于岛上的可再生能源最大发电功率。设资源岛全年时间段内可再生能源的最大发电功率为 P_{Gmax} , 制淡装置的台数和蓄电池的个数应满足如下约束条件:

$$\begin{cases} N_1 \cdot P_1 + N_2 \cdot P_2 \geq P_{Gmax} \\ N_1 \geq 0 \\ N_2 \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

(2) 蓄电池 SOC 约束

$$S_{min} \leq S_{soc} \leq S_{max} \quad (34)$$

式中, SOC 取值为 20%~90%。

4 模型求解

基于上述目标和约束, 本文待求解问题为

$$\min f(x) = \min C_{total} = \min(N_1, N_2) \quad (35)$$

使用 Matlab 中 cplex 工具包求解上述整数规划问题。cplex 是 IBM 公司一款高性能的数学规划问题求解器, 可以快速、稳定地求解线性规划、混合整数规划、二次规划等一系列规划问题。遍历不等式可行域内所有情况, 选取综合成本最小的配置方案, 即可得到资源岛上可再生能源消纳装置的最优配置情况。寻优流程图如图 2 所示。

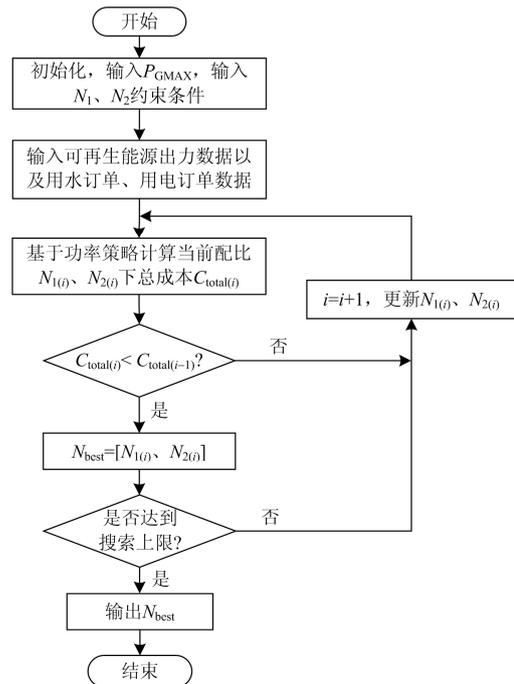


图 2 寻优流程图

Fig. 2 Optimization flowchart

5 仿真分析

5.1 算例简介

南海海域某远洋海岛群由 A、B 两个相邻岛礁组成，A 为无人岛礁，B 岛为负荷中心岛，两岛相距 12 km。资源岛上分别建有风力、光伏、波浪能发电系统和制淡装置、锂电池储能装置，以柴油机为备用电源。负荷中心岛将每日用水用电需求发送给资源岛，资源岛按订单要求生产物资能量，并通过换电船舶转运至负荷中心岛。本文定位未来远洋海岛建设，由于岛屿目前并未被成熟开发，为了对方案的有效性进行评估和验证，借鉴东澳岛等岛屿负荷数据以及用水量情况^[21-22]，根据岛屿面积及规划方案等比例缩放得到。

资源岛可再生能源拟合后出力曲线如图 3 所示，资源岛全年用水订单需求曲线如图 4 所示，全年用电需求订单曲线如图 5 所示。

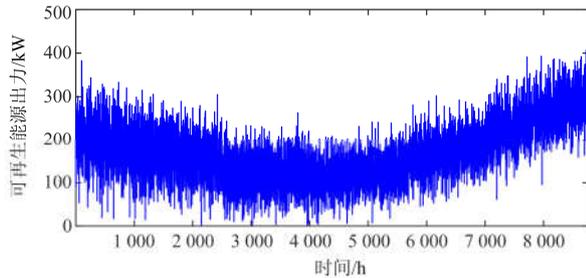


图 3 可再生能源拟合后出力曲线

Fig. 3 Renewable energy output curve after fitting

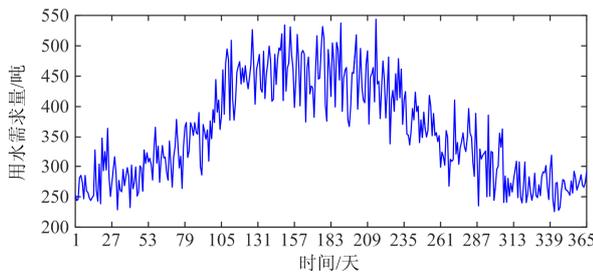


图 4 用水需求订单曲线

Fig. 4 Water demand curve

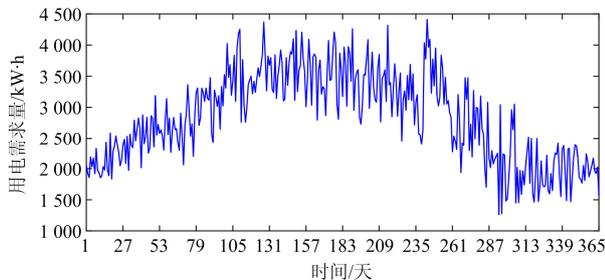


图 5 用电需求订单曲线

Fig. 5 Electric demand curve

仿真所需部分参数如表 2 所示^[23]。

表 2 仿真所需参数

Table 2 Parameters required for simulation

对象	指标	参数
制淡装置	单机额定功率/kW	15
	日产水量/(吨/台)	40
	单台价格/(元/台)	300 000
	电转水系数 k_1 /(kW·h/吨)	5
储能装置	额定容量	3.2 V 200 Ah
	单价/(元/kW·h)	3 260
	最大放电深度	60%
柴油发电机组	燃油消耗率/(kg/kW·h)	0.2
	柴油到岸价格/(元/kg)	30
货运成本系数	ε_w /(元/吨/km)	3
	ε_e /(元/kW·h/km)	0.3

5.2 算例结果分析

根据建立的目标函数，利用 Matlab 仿真求得结果见表 3 所示。每一组消纳装置容量配比对应一种配置方案，根据年总成本由低到高排序，共选取 20 组配置方案。

根据方案 1 的配置方案，资源岛实际产水量基本上按照负荷中心岛水订单需求进行制备，只有在用水高峰季节出现少数几天不能满足水订单需求的情况，如图 6 所示。

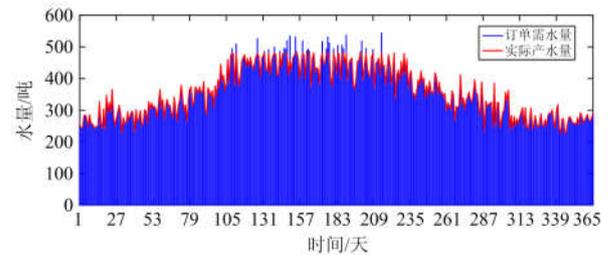


图 6 方案 1 全年产水量与需水量情况

Fig. 6 Water production and demand in scenario 1

图 7 是订单电能需求量和资源岛蓄电池实际充电量对比图。在年初的两个月和年末的两个月，资源岛的蓄电池实际充电量要多于订单中电能需求量，其他时段则少于订单中电能需求量。

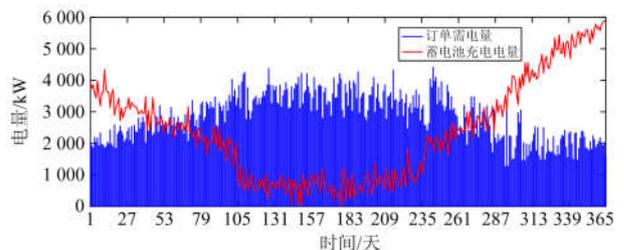


图 7 方案 1 全年充电量与需电量情况

Fig. 7 Electric production and demand in scenario 1

由图 6 和图 7 可知, 在用水、用电高峰期资源岛制淡和储能均不能满足负荷中心岛用水和用电需求。而在用水、用电低谷期, 资源岛制淡和储能存在盈余。主要原因可从以下两个方面分析: 从发电层面分析, 资源岛可再生能源出力存在季节性变化, 每年的春、冬季节风速较大, 波浪能也更丰富, 可

再生能源出力较大。夏、秋季节风速较小, 波浪能也较小, 虽然太阳辐射更强, 但是光伏发电的总功率较小, 可再生能源发电总体出力小; 从负荷层面分析, 春、冬季节远洋海岛生产活动趋缓, 用水、用电需求量较少, 而夏、秋季节对应远洋海岛生产活动旺季, 用水、用电量较大。

表 3 消纳装置容量配置方案

Table 3 Device capacity allocation scheme

容量配置 方案	消纳装置容量配比		年均投资成本/元	年运行成本/元	年运输成本/元	年柴油机发电 成本/元	年总成本/元
	制淡装置/台	蓄电池/个					
方案 1	5	480	183 284	9 164	324 584	1 341 504	1 858 536
方案 2	6	449	192 716	9 635	353 065	1 375 611	1 931 027
方案 3	4	511	173 851	8 692	289 412	1 493 464	1 965 419
方案 4	3	543	164 634	8 231	253 948	1 720 866	2 147 679
方案 5	7	418	202 148	10 107	366 430	1 608 058	2 186 743
方案 6	8	386	211 366	10 568	371 404	1 679 364	2 272 702
方案 7	9	355	220 798	11 039	373 780	1 680 362	2 285 979
方案 8	10	324	230 230	11 511	376 411	1 674 283	2 292 435
方案 9	11	293	239 662	11 983	379 441	1 667 188	2 298 274
方案 10	12	261	248 880	12 444	383 190	1 659 696	2 304 210
方案 11	13	230	258 312	12 915	387 576	1 650 272	2 309 075
方案 12	14	199	267 744	13 387	392 563	1 640 529	2 314 223
方案 13	15	168	277 177	13 858	398 344	1 645 730	2 335 109
方案 14	16	136	286 394	14 319	405 311	1 815 337	2 521 361
方案 15	2	574	155 202	7 760	218 319	2 146 848	2 528 129
方案 16	17	105	295 827	14 791	413 156	2 009 051	2 732 825
方案 17	18	74	305 259	15 262	422 531	2 242 016	2 985 068
方案 18	1	605	145 769	7 288	182 535	2 668 734	3 004 326
方案 19	19	43	314 691	15 734	433 076	2 505 640	3 269 141
方案 20	20	11	323 909	16 195	445 014	2 804 099	3 589 217

为了说明方案 1 的优越性, 从解集中选择具有代表性的方案 8 和方案 20 进行对比。

1) 方案 8 仿真结果

方案 8 与方案 1 成本对比如图 8 所示。由图可见方案 8 各项成本都比方案 1 高。

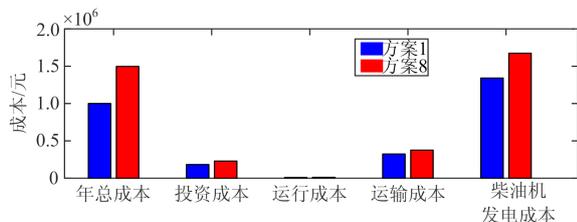


图 8 方案 1 和方案 8 成本对比

Fig. 8 Cost comparison between scenario 1 and 8

方案 8 中资源岛淡水产量和订单淡水需求量对比见图 9; 蓄电池充电电量与订单电能需求量对比见图 10。

在用水高峰时段, 该方案不能满足用水订单需求的天数比方案 1 要少。原因是该配置方案增大了制淡装置容量, 解决了因制淡装置容量不足而导致的制淡水量不足的问题。结合制淡装置配置的容量, 其理论生产能力要远大于最大用水订单中水的需求量, 说明在全年中较长时段制淡机组会大量闲置, 经济性差。但由于制淡装置容量增大, 制淡装置耗能增多, 蓄电充电量减少, 使得蓄电池充电量为零的天数比方案 1 多。

2) 方案 20 仿真结果

该配置方案下, 该方案与方案 1 成本对比见图 11, 资源岛淡水产量和订单淡水需求量对比见图 12, 蓄电池充电电量与订单电能需求量对比见图 13。方案 20 中, 资源岛产水量绝大部分时段都大于用水需求, 而蓄电池充电量极少能满足用电需求。原因是该配置方案下, 制淡装置容量特别大, 蓄电池容量特别小, 蓄电池不能完全消纳在完成水订

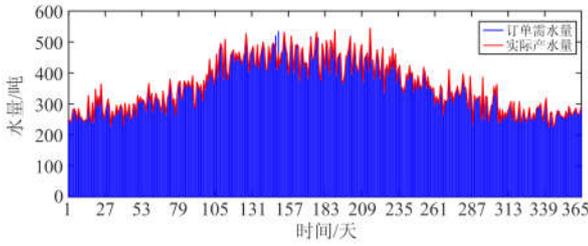


图 9 方案 8 中全年产水量与需水量情况

Fig. 9 Water production and demand in scenario 8

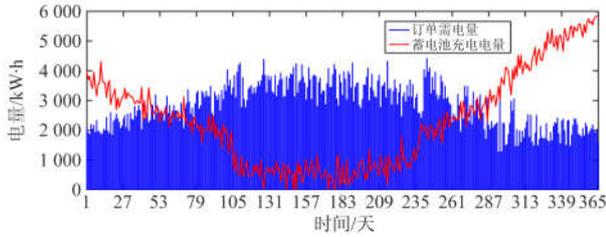


图 10 方案 8 中全年充电量与需电量情况

Fig. 10 Electric production and demand in scenario 8

单任务后剩余的可再生能源。于是出现了制水量特别大，而充电量比较小的情况。由于产水量大，对水的存储和船舶运输能力都有更高的要求，需要更多的建设成本。与方案 1 成本对比，该方案经济性最差。

5.3 对比算例分析

为了验证本文所提方法的有效性，设计以下对比场景：沿用前一算例的背景，在资源岛仅建立蓄电池储能装置来消纳可再生能源，淡水由负荷中心岛自行制备。通过仿真计算，该场景消纳装置容量

配比如表 4 所示。

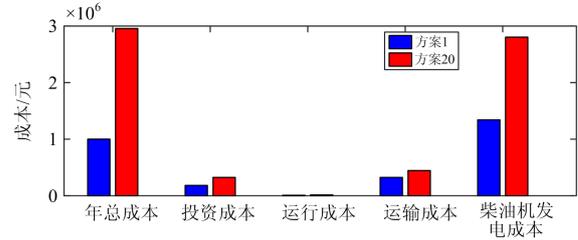


图 11 方案 1 和方案 20 成本对比

Fig. 11 Cost comparison between scenario 1 and 20

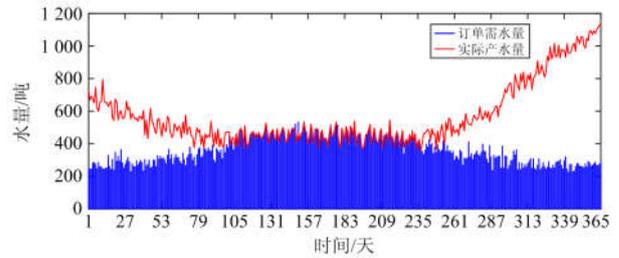


图 12 方案 20 中全年产水量与需水量情况

Fig. 12 Water production and demand in scenario 20

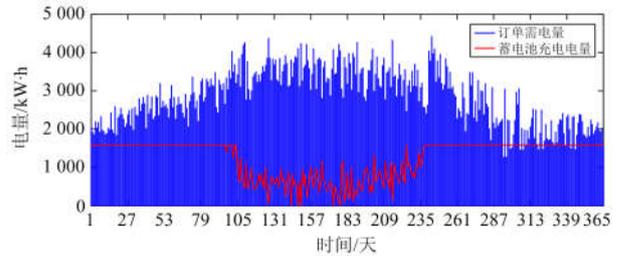


图 13 方案 20 中全年充电量与需电量情况

Fig. 13 Electric production and demand in scenario 20

表 4 对比算例仿真结果

Table 4 Simulation results of comparison example

资源岛消纳装置容量配比		年均投资成本/元	年运行成本/元	年运输成本/元	年柴油机发电成本/元	年总成本/元
制淡装置/台	蓄电池/个					
0	636	136 337	6 817	146 704	3 194 334	3 484 189

与表 3 中 20 种配置方案的年总成本进行对比，对比算例的年总成本是方案 1 的 2.9 倍，与方案 1 各项成本对比见图 14。由图可见，对比算例的投资成本和运输成本比方案 1 稍低，但是为此支出的柴油发电成本大大增加，与方案 1 相比经济性差。

6 结论

本文以资源岛为重点，就资源岛与负荷中心岛间不具备电缆直联场景下资源岛的可再生能源就地消纳问题展开了研究。研究表明：

1) 使用制淡装置和蓄电池储能装置联合消纳资源岛可再生能源以支援负荷中心岛物资能量需求

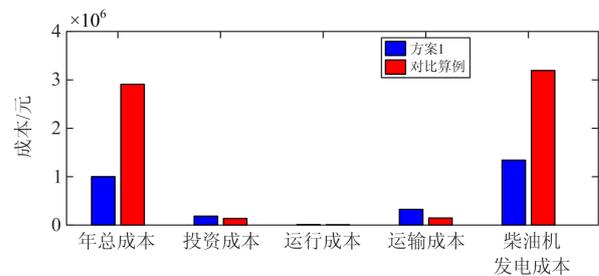


图 14 对比算例与方案 1 成本对比

Fig. 14 Cost comparison between scenario 1 and comparison example

的模式比只使用单一类型的制淡装置或储能装置消纳可再生能源更具优越性;

2) 远洋海岛供能的总成本中, 柴油发电成本占比非常大, 提高可再生能源发电比例以减少柴油机发电甚至替代柴油发电是降低成本的重要方式;

3) 对于具备旅游属性的远洋海岛而言, 其负荷中心岛可能需要配备氢动力汽车等清洁能源车, 潜水等旅游项目也可能对氧气有较大的需求。因此, 负荷中心岛的需求可能不仅限于电力和淡水, 在资源岛上, 如何根据负荷中心岛多样化的能源资源需求, 对配置例如制氢-制氧等更多的新能源消纳装置, 并从总体角度对蓄电、制淡、制氢-制氧装置进行一体化的定容, 是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] ZHANG X P. Marine energy: the key for the development of sustainable energy supply[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 3-5.
- [2] WANG Dong, LU Kaiyuan. Design optimization of hydraulic energy storage and conversion system for wave energy converters[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 70-78. DOI: 10.1186/s41601-018-0080-6.
- [3] 黄景光, 陈波, 林湘宁, 等. 含潮汐电站的海岛微网多目标优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 47-52. HUANG Jingguang, CHEN Bo, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimal scheduling of the micro-grid with tidal power in insular islands[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 47-52.
- [4] ZHANG Da, ZHANG Xiliang, HE Jiankun, et al. Offshore wind energy development in China: current status and future perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4673-4684.
- [5] 林湘宁, 陈冲, 周旋, 等. 远洋海岛群综合能量供给系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 98-109. LIN Xiangning, CHEN Chong, ZHOU Xuan, et al. Integrated energy supply system of pelagic clustering islands[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 98-109.
- [6] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [7] 崔德民, 赵海兵, 方燕琼, 等. 考虑就地消纳与外送相协调的可再生能源生产模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 45(16): 112-118. CUI Demin, ZHAO Haibing, FANG Yanqiong, et al. Renewable energy production simulation considering the coordination between local consumption and transmission[J]. Power System Protection and Control, 2018, 45(16): 112-118.
- [8] 曾博, 杨煦, 张建华. 考虑可再生能源跨区域消纳的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 148-158. ZENG Bo, YANG Xu, ZHANG Jianhua. Multi-objective optimization for active distribution network scheduling considering renewable energy harvesting across regions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 148-158.
- [9] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑储能系统特性的独立微电网系统经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 25-31. CHEN Jian, WANG Chengshan, ZHAO Bo, et al. Economic operation optimization of a stand-alone microgrid system considering characteristics of energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 25-31.
- [10] 辛焕海, 周飞, 杨欢, 等. 摘箬山海岛新能源电网设计关键技术[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(4): 396-409. XIN Huanhai, ZHOU Fei, YANG Huan, et al. Key technologies applied in Zhairuo island new energy power system[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2012, 32(4): 396-409.
- [11] 吴峰, 杨柳燕. 孤立运行模式下海岛综合能源系统的能量控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 53-60. WU Feng, YANG Liuyan. Research on energy control strategy of isolated island integrated energy system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 53-60.
- [12] 初壮, 李钊, 白望望. 计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 34-41. CHU Zhuang, LI Zhao, BAI Wangwang. Optimal siting and sizing of distributed generations considering uncertainties and environmental factors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 34-41.
- [13] 管志成, 丁晓群, 张木银, 等. 考虑时序特性含电动汽车配电网分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 24-31. GUAN Zhicheng, DING Xiaqun, ZHANG Muyin, et al. Optimal allocation of distributed generation of distributed network containing electric vehicle considering timing characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 24-31.
- [14] ESMAIL M, AHMET Z S, ABDULLAH A, et al. Modeling and optimization of hybrid wind-solar-powered reverse osmosis water desalination system in Saudi

Arabia[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 75: 86-97.

[15] 张建华, 于雷, 刘念, 等. 含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/diesel/storage and seawater desalination load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 102-112.

[16] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 36(17): 34-39.
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 36(17): 34-39.

[17] 赵波, 张雪松, 李鹏, 等. 储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计 and 应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 161-167.
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, LI Peng, et al. Optimal design and application of energy storage system in Dongfushan island stand-alone microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 161-167.

[18] 陈健, 王成山, 赵波, 等. 考虑不同控制策略的独立型微电网优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 1-6.
CHEN Jian, WANG Chengshan, ZHAO Bo, et al. Optimal sizing for island stand-alone microgrid considering different control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 1-6.

[19] 梅生伟, 王莹莹, 刘锋. 风-光-储混合电力系统的博弈论规划模型与分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 13-19.
MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13-19.

[20] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.
QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-15.

[21] 杨欢, 赵荣祥, 辛焕海, 等. 海岛电网发展现状与研究动态[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 95-105.
YANG Huan, ZHAO Rongxiang, XIN Huanhai, et al. Development and research status of island power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 95-105.

[22] ZHAO B, ZHANH X, LI P, et al. Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island[J]. Applied Energy, 2014(113): 1656-1666.

[23] 魏繁荣, 随权, 林湘宁, 等. 考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1045-1053.
WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Optimized energy control strategy about daily operation of islanded microgrid with wind/photovoltaic/diesel/ battery under consideration of transferable load efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1045-1053.

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-03-25

作者简介:

谭爱国(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电力系统运行与控制的研究; E-mail: tanaiguo@hust.edu.cn

何志恒(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电、微电网; E-mail: 897195842@qq.com

李正天(1979—), 男, 通信作者, 副教授, 研究方向为电力系统保护、新型发电和电网技术。E-mail: 453874933@qq.com

(编辑 魏小丽)