基于多场景生命周期评价的海岛小型风力发电机预安装评估

莫秋云[1,2], 廖智强[1], 刘伟豪[2], 蒋　立[2], 管会森[2], 何声文[1]

(1. 桂林电子科技大学 海洋信息工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了准确评估海岛风电系统中小型风力发电机的绿色效益, 以南海某海岛(记为 South)和东海某海岛(记为 East)为例, 引入全生命周期评价技术, 在此基础上进行多场景因素分析, 并以能量偿还时间为指标, 对比两安装地评估结果, 对风机进行预安装评估。评估关键在于, 利用 Gabi 软件 balance 模块得出风机生命周期生命周期总能耗, 无场景因素下总能耗为 2 331.36 MJ(South)与 2 372.83 MJ(East), 多场景因素下总能耗为 2 110.01 MJ(South)与 2 151.03 MJ(East); 通过实验获得风机在不同风速下的功率特性数据, 采用概率论求解法求得安装后风机年发电量为 276.45 kWh(South)与 304.96 kWh(East); 通过 EPBT 偿还公式计算得到, 无场景因素偿还时间为 2.34 a(South)与 2.16 a(East)、多场景因素偿还时间为 2.12 a(South)与 1.96 a(East)。结果表明: 在评估过程中引入场景因素, 风机绿色效益评估更准确; 该评估可以给海岛小型风机的安装选址提供参考, 避免造成不必要的资源浪费。

关键词: 海岛风电; 海岛小型风机生命周期评价; 海岛小型风机生命周期场景; 能量偿还时间

中图分类号: TK89　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2020)04-0124-07

DOI: 10.11759/hykx20190723002

海岛风电是海上风电中的重要组成部分[1]。大中型海岛主要通过海底电缆联网供电[2]; 小型海岛一般距离内陆较远, 由于长距离海底电缆供电故障率高、传输功率损耗大[3]和自身面积限制等问题, 风电系统中多采用小型风力发电机。然而多数海岛风电系统只是内陆风电系统的一种简单移植, 部分风机安装后的发电能力远低于预期, 甚至无法抵消生产能耗, 违背了绿色设计初衷[4]。而生命周期评价(life cycle assessment, LCA)技术, 是针对某一个产品, 对整个生命周期的环境属性和潜在的影响进行评价的技术[9], 能够有效的评估风机绿色效益。所以, 有必要利用 LCA 技术对海岛小型风机进行预安装评估, 判断其是否真正的绿色环保。

杨举华等[5]对上海东海大桥风电场进行了 LCA 分析, 得出了设备生产与运输阶段能耗最大的结论; Bonou 等[6]分别评估了欧洲海陆风电向电网提供 1 kWh 电力的影响, 发现相对于陆上风电场海上风电场总体影响更高; Chipindula[7]对得克萨斯州与墨西哥湾海岸的陆上、浅水、深水 3 个位置进行了分析评价, 发现生命周期阶段中影响最大的是材料加工阶段; Weinzettel[8]对一个漂浮式基础概念模型进行了 LCA 研究, 得出了浮式风电场与非浮式风电场对环境的影响相似的结论。

目前国内外学者对海上风电绿色效益评估仍集中在大型海上风力发电机和海上风电场, 对应用于海岛的小型风力发电机的相关评估研究文献很少。并且在评估过程中, 大多是都基于某些单一的数据进行评价, 对场景特征反应较少。因此, 本文通过对风机进行南海、东海两个预安装海岛的多场景 LCA 预安装评估, 对比验证评估结果, 从而更准确评估风机绿色效益, 为海岛小型风机的安装选址提供参考。

1　生命周期与场景

产品生命周期的从开始到结束, 其中的环境属性主要表现为材料的变化以及能量的传递。其生命周期阶段中环境影响示意图如图 1 所示。

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2019-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51465010); 广西自然科学基金面上项目(2018GXNSFAA050077)

[Foundation: National Natural Science Foundation Project, No.51465010; Project of Guangxi Natural Science Foundation , No.2018GXNSFAA050077]

作者简介: 莫秋云(1971-), 女, 广西桂林人, 教授, 目前主要研究方向离网小型垂直轴风力发电机的应用, 电话: 13768132518, E-mail: 6285745@qq.com; 廖智强, 通信作者, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向为海上风电与 LCA, 电话: 18677335801, E-mail: 804755138@qq.com

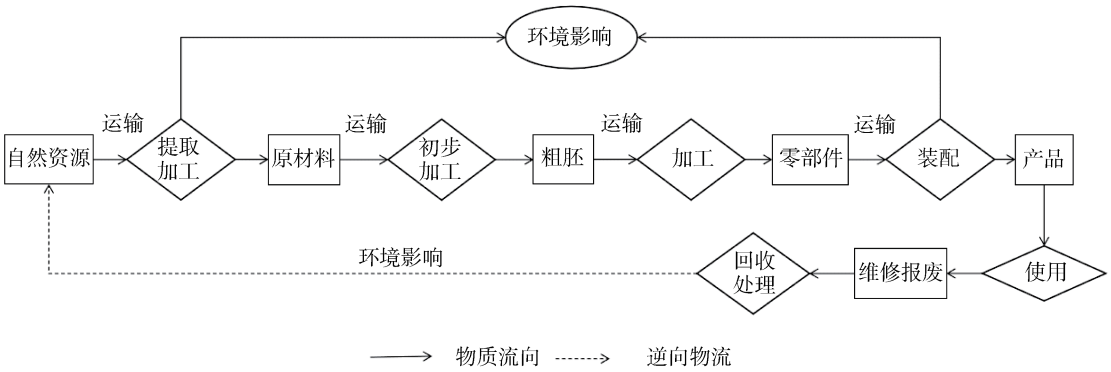

图 1　产品的生命周期阶段对环境的影响

Fig. 1　Environmental impact of the life cycle stage of a product

上述所发生的对环境影响的各类活动的特征描述, 即是场景。主要包括时空、人员、环境自身、方式等方面。某产品生命周期的部分场景表 1 所示。

表 1　某产品生命周期部分场景

Tab. 1　Partial scenarios of a product life cycle

周期阶段(部分)	属性	示例
生产制造	工艺	先进工艺; 一般工艺
	地点	国内或国外
	人员	专业技术工; 普通工人
产品运输	设备	汽车; 公路; 轮船
	路线	公路; 铁路; 水路
	人员	专业人员; 一般人员

产品生命周期评价的难点主要在于数据的获取与准确性, LCA 数据的多态性、时变性、敏感性是其中的主要原因。在产品生命周期阶段, 引入场景因素, 进行多场景的综合分析, 能够使数据提升评价的准确性。

2　多场景总输入能量计算

根据国际标准化组织(ISO)规定[10], LCA 主要包括四个步骤: 目的和范围的确定、清单分析、影响评估以及结果解释。本文主要是利用生命周期评价技术, 对风机生命周期的总输入能量进行多场景的综合分析计算, 主要包括目的范围确定、清单分析以及评价结果三部分。生命周期输入总能量记为 E:

$$E = E_r + E_p + E_t + E_u + E_s , \tag{1}$$

式中: E_r 为原材料阶段能量输入, E_p 为生产阶段能量输入, E_t 为运输阶段能量输入, E_u 为使用阶段能量输入, E_s 为报废阶段能量输入。

2.1　目的与范围

研究目的: 计算多场景因素下, 风机生命周期总输入能量(生命周期中的前期市场调研与风机设计部分生产厂家已定型不做计算); 根据研究目的和输入总能量 E 的计算公式(1)划分研究范围, 主要包括: 生产耗能、运输耗能、使用耗能及报废处理耗能 4 部分, 研究范围系统边界图如图 2 所示。

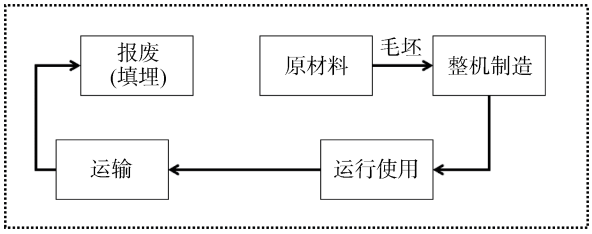

图 2　风机 LCA 系统边界图

Fig. 2　Boundary diagram of the wind turbine life cycle assessment system

在实际的使用过程中, 相对大型并网风力发电机, 一般的离网小型风力发电机耗能极小[11], 且数据获取不便, 故本文在计算风机生命周期总输入能量 E 时, 使用阶段的能耗 E_u 忽略不计。

2.2　清单分析

清单分析是生命周期评价中的基础部分, 也是工作量最大的一个部分。为阅读方便, 以表格形式列出清单数据。主要包括以下 4 个方面: 原材料清单、整机生产数据清单、运输清单、报废处理清单。

南海和东海预安装的风机选由同一生产厂家生产, 均以 JDX-S-300 型垂直轴风力发电机为研究对象, 其中: 风机启动风速 2 m/s、额定工作风速 12 m/s、可正常工作风速为 2~15 m/s, 额定功率 300 W、最大功率 400 W、正常工作时输出功率 0~300 W, 整机重量 33.5 kg。

生产数据清单主要通过企业以往的公开数据获得, 生产制造过程使用混合电, 耗电量为 50 kWh,

主要部分清单数据如表 2 所示。

表 2　风机原料清单
Tab. 2　Raw material list of wind turbines

部件	材料	质量/kg
基座	100Cr6 轴承钢	25
叶片	铝合金	6.5
涂层	聚氯乙烯	2

随着社会进步，生产阶段场景会产生一定程度的变化，如企业的制造工艺水平和员工结构等。杨传明[12]通过对能耗和气体排放数据进行研究，发现我国工业的能耗水耗距离、二氧化硫距离等，已逐年下降，年均幅度分别为: 10.34%、10.13%、21.42%; 杨志杰[13]通过对企业中员工的总数、结构、运行效率关系进行分析，发现一定程度上的控制员工总量，并且调整员工的结构，能够提升企业人力资源的管理效率，进而提升运营效率。此类生产阶段场景因素，会对后续的生产耗能的 balance 计算结果造成一定影响。

拟定安装的海岛，陆上运输距离为 513 km (South) 与 1 433 km(East)，海上运输距离为 36 n mile(South) 与 13 n mile(East)。根据运输距离与运输方式，列出相应的无场景因素运输数据清单 1，如表 3 所示。

表 3　风机运输数据清单 1
Tab. 3　Transport data list 1 of wind turbines

运输地点	运输方式	运输工具	运输距离
South	公路	卡车	513 km
	水路	渡轮	36 n mile
East	公路	卡车	1 433 km
	水路	渡轮	13 nmile

考虑运输阶段的场景因素，如厂家为节约成本，生产厂址与装船地点之间原采用汽车运输，现改用火车运输。此类场景因素引入后，改变了运输阶段中运输距离和运输方式，会对后续的能耗计算产生一定影响。

预安装的南海及东海海岛，现有运输方式中，从大陆港口至海岛阶段仍采用货轮运输，陆上运输阶段原采用公路运输，因生产规模的扩大而采用大批量运输，基本改为铁路运输方式以节约成本。在引入场景因素后，运输阶段数据清单 2 如表 4 所示。

风机的制造材料主要为一般金属材料(普通铝材)，回收价值较低；部分构件中含有塑料成分，采用焚烧处理方式容易造成环境污染，所以南海和东海海岛预安装风机的报废阶段均选用填埋处理方式。报废阶段处理清单如表 5 所示。

表 4　风机运输数据清单 2
Tab. 4　Transport data list 2 of wind turbines

运输地点	运输方式	运输工具	运输距离
South	铁路	火车	744 km
	水路	渡轮	36 n mile
East	铁路	火车	1 421 km
	水路	渡轮	13 n mile

表 5　风机报废清单
Tab. 5　Scrap list of wind turbines

部件	分类	质量/kg	报废处理方式
叶片	固体废弃物	6.5	填埋
基座	一般金属	25	填埋
涂层	塑料废料	2	填埋

利用 Gabi 软件，通过输入风机生命周期中的清单数据，从而得到能耗数据。由于南海和东海海岛的生产方式、运输方式和报废回收方式相同，所以两地海岛建立的 plan 模型也相同，只在模型中输入的清单数据(主要是运输距离)存在区别，建立的具体数据部分的 plan 模型，其中的生产阶段 plan 模型如图 3、处理阶段 plan 模型如图 4 所示。

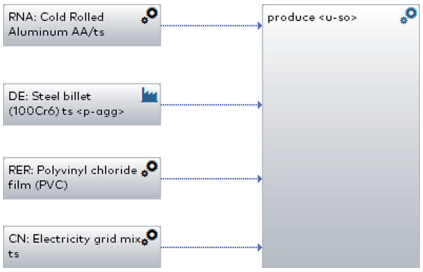

图 3　生产阶段 plan 模型
Fig. 3　Model of the production stage plan

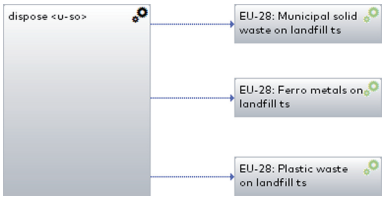

图 4　处理阶段 plan 模型
Fig. 4　Model of the disposal stage plan

2.3　评价结果

对建立的风机生命周期 plan 模型，利用 Gabi 软件中 balance 模块进行计算，得到生命周期各阶段耗能如图 5 所示。

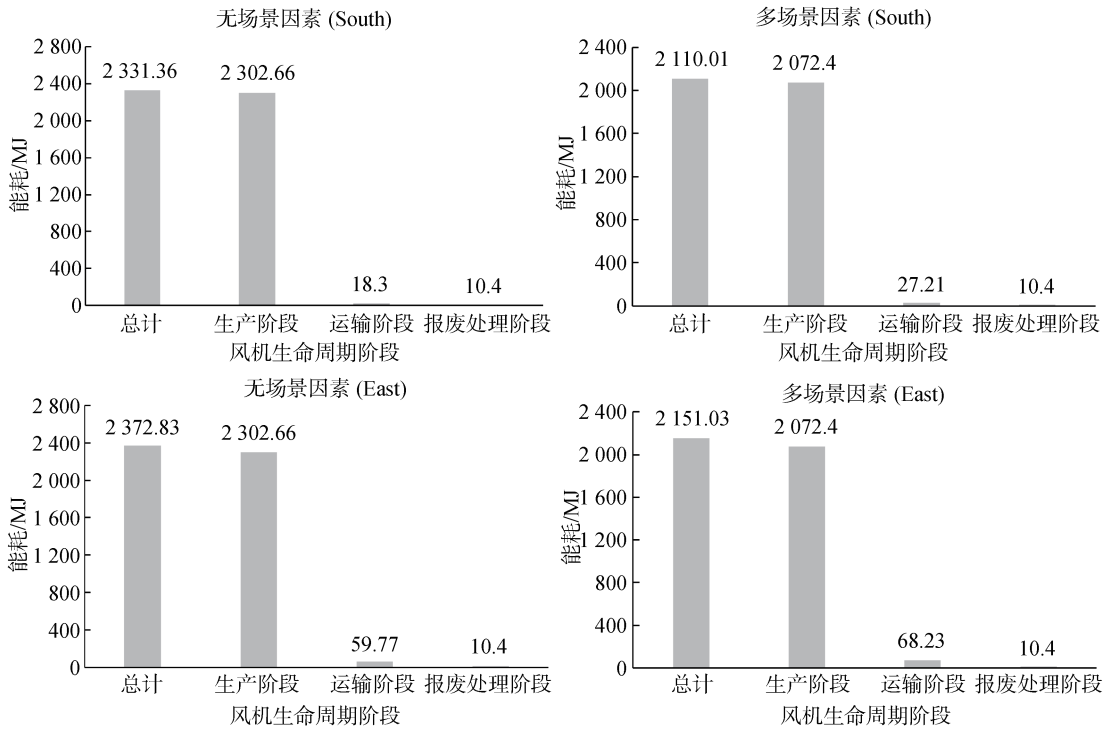

图 5　两安装地点风机生命周期能耗图

Fig. 5　Life cycle energy consumption diagram of wind turbines at two installation sites

从图中可以得出：无场景因素引入时生命周期总能耗 2 331.36 MJ(South)与 2 372.83 MJ(East)，多场景因素生命周期总耗能 2 110.01 MJ(South)与 2 151.03 MJ(East)。其中，耗能最高的仍是生产阶段，引入场景因素进行分析计算后，生产能耗有一定程度的降低；相对于生产能耗，运输能耗占比很小，在引入场景因素后有一定提升；报废回收阶段没有考虑场景因素影响(即原处理方式与现处理方式相同)，能耗无变化。其中南海与东海海岛能耗部分主要区别在于运输阶段，主要是因为生产厂址与俩海岛之间距离相差较大；预安装风机均由同一厂家进行生产制造，生产耗能部分差异极小忽略不计。

3　能量偿还时间

能量偿还时间(Energy Pay Back Time, EPBT)作为评价一个系统发电能力的重要指标[14]，指的是发电系统中生命周期阶段输入总能量与其年发电量的比值，将偿还时间记为 T，具体表达式为

$$T = E_{\mathrm{I}} / E_{\mathrm{O}}, \tag{2}$$

式中：E_{I} 为输入总能量；E_{O} 为年发电量。

预安装的南海海岛为亚热带季风气候，风速变化相对稳定，一年之中存在一定数量的大风天气，台风影响时间极少(v>14 m/s)，忽略不计；预安装的东海海岛为亚热带海洋性季风气候，一般情况下风速较为平稳，且风力存在着明显的局地性、季节性特征[15]。风速频率分布数据主要通过气象部门的统计获得，分别如表 6 所示。

表 6　风速与频率

Tab. 6　Wind speed and frequency

地点	v(m/s)	f	地点	v(m/s)	f
South	[0~2)	0.082 0	East	[0~1)	0
	[2~4)	0.242 8		[1~2)	0.007 0
	[4~6)	0.293 4		[2~3)	0.022 9
	[6~8)	0.301 1		[3~4)	0.116 0
	[8~10)	0.070 23		[4~5)	0.312 5
	[10~12)	0.009 853		[5~6)	0.191 9
	[12~14)	0.007 17		[6~7)	0.296 4
	[14~∞)	0		[7~∞)	0

风机年发电量主要利用概率论求解方法计算[16]，计算表达式如下：

$$f(v) = \frac{1}{b-a}, \tag{3}$$

$$\overline{P} = \int_0^{\infty} P(v) f(v) \mathrm{d}v, \tag{4}$$

$$E_{\mathrm{O}} = 24 \times 365\overline{P}, \tag{5}$$

式中: $f(v)$为风频概率密度函数, a 和 b 为风频采样中选取的风速区间[a, b](以表 6 地点 South 为例, 当 0 ≤v<2, $f(v)$=0.041 0; 当 2≤v<4, $f(v)$=0.121 4); $\overline{P}$ 为不同风速下平均功率; $P(v)$为风机输出功率与当前风速函数。

经实验获取的风机风速与功率数据通过 MATLAB 进行多项式拟合, 得到功率特性曲线图, 实验测试平台如图 6, 曲线图如图 7 所示。

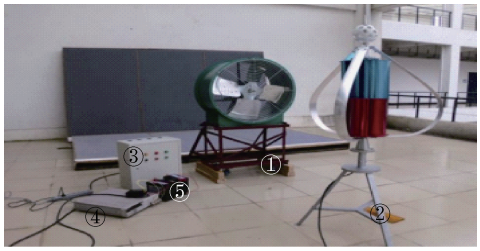

图 6　实验平台

Fig. 6　Experimental platform

注: ①轴流风机; ②JDX-S-300 型垂直轴风力发电机; ③控制箱; ④整流器; ⑤蓄电池

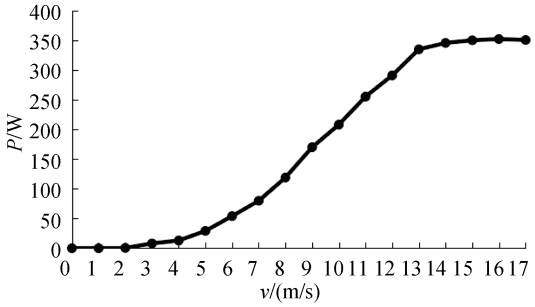

图 7　风机功率特性曲线图

Fig. 7　Power characteristic curve of wind turbines

图 7 中曲线函数表达式如下:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & (0 \leqslant v < 2) \\ 0.002\,813v^2 - 0.009\,353v + 0.007\,553, & (2 \leqslant v \leqslant 10) \\ -0.003\,025v^2 + 0.065\,8v + 0.005\,327, & (10 \leqslant v \leqslant 17) \\ 0, & (v > 17) \end{cases} \tag{6}$$

结合式(4)与式(5)可计算出拟安装位置风机年发电量为 276.45 kWh(South)与 304.96 kWh(East), 其中 1 kWh=3.6 MJ。根据式(2), 将之前计算的无场景因素引入时生命周期总能耗与多场景因素生命周期总能耗代入计算, 分别求得: 安装后的无场景能量偿还时间约为 2.34 a(South)与 2.16 a(East), 引入场景因素后为 2.12 a(South)与 1.96 a(East)。

绿色效益评估主要通过能量偿还时间与风机预期寿命进行比较, 偿还时间越短, 风机寿命越长, 绿色效益越好。厂家给出的此类风机预期使用寿命在 20 年左右, 相对无场景因素引入评估, 进行多场景因素评估后, 在南海及东海两个预安装海岛, 风机的绿色效益相对原有结果均有所提升。

4　结论

利用生命周期评价技术, 分别以南海某岛及东海某岛为预安装地点, 对一款小型垂直轴风力发电机进行多场景分析的预安装评估。通过对比南海与东海海岛的评估结果, 验证了方法的普及性的同时, 发现引入场景因素后, 南海及东海海岛风机生命周期总输入能量和能量偿还时间计算结果更准确更符合实际, 相对未引入时计算结果均有一定程度的降低, 风机绿色效益更好。主要结论如下:

1) 该预安装方法具有普及性。在已知风机的参数、工艺、生产厂家厂址、拟安装地点等相关数据时, 利用该评估方法, 可以对风机的绿色效益进行评估, 并根据评估结果, 判断风机的选型及选址是否合适, 从而避免不必要的资源浪费。

2) 该评估方法评估结果更准确。通过在生命周期评价过程中引入场景因素, 进行多场景综合分析, 能够提升生命周期中能耗数据计算的准确性, 进而更准确的评估风机安装后的绿色效益, 为风机的安装提供准确参考。

本文只是给出了一种海岛小型风机的预安装评估方法, 以准确评估风机的绿色效益。研究过程中发现, 海岛小型风电系统受到相对恶劣的海洋环境影响[17], 风机实际使用寿命大多低于厂家给出的预期寿命, 绿色效益往往低于预期。因而后续可对影响风机实际使用寿命的相关因素展开进一步的分析研究, 如通过提升风机的可靠性、增加保护措施等, 以提升风机的实际使用寿命, 使风机更加绿色环保。

参考文献:

[1] 赵树迪, 郑宇. 一种推进中国海岛县域经济发展的复合模式的提出: 以山东长岛县为例[J]. 科学与管理, 2017, 37(1): 49-53.
Zhao Shudi, Zheng Yu. A complex model to assess economic growth of China's island counties: A case study of Changdao County[J]. Science and Management, 2017, 37(1): 49-53.

[2] 李程, 李剑, 崔芳芳. 舟山海岛电网规划方案探讨[J].

浙江电力, 2011, 30(6): 4-8.
Li Cheng, Li Jian, Cui Fangfang. Exploration on power grid planning of Zhoushan Islands[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(6): 4-8.

[3] 袁康龙, 许峰, 李俊杰. 考虑本地气电和柔直联网的海岛供电方案研究[J]. 南方能源建设, 2018, 5(4): 73-77.
Yuan Kanglong, Xu Feng, Li Junjie. Research on local natural gas power development and flexible HVDC connection with mainland for islands[J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(4): 73-77.

[4] 徐刚, 宋颖慧. 面向机电产品的绿色设计探析[J]. 机电产品开发与创新, 2018, 31(3): 32-34.
Xu Gang, Song Yinhui. An analysis of green design for electromechanical products[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2018, 31(3): 32-34.

[5] 杨举华, 张力小, 王长波, 等. 基于混合生命周期分析的我国海上风电场能耗及温室气体排放研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 786-792.
Yang Juhua, Zhang Lixiao, Wang Changbo, et al. Energy consumption and greenhouse gas emission of an offshore wind farm in China: A hybrid life cycle assessment perspective[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(2): 786-792.

[6] Bonou A, Laurent A, Olsen S I, et al. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application[J]. Applied Energy, 2016, 180: 327-337.

[7] Jesuina C, Venkata B, Hongbo D, et al. Life cycle environmental impact of onshore and offshore wind farms in Texas[J]. Sustainability, 2018, 10(6): 2022-2040.

[8] Weinzettel J, Reenaas M, Solli C, et al.Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine[J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 742-747.

[9] 陈舒婷, 龚卓炫. 生命周期评价研究方法与展望[J]. 广东化工, 2018, 45(22): 61-62.
Chen Shuting, Gong Zhuoxuan. Research methods and prospects of life cycle assessment[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(22): 61-62.

[10] ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle: Life Cycle Inventory Analysis[S].

[11] Bukala J, Damaziak K, Karimi H R, et al. Modern small wind turbine design solutions comparison in terms of estimated cost to energy output ratio[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 1166-1173.

[12] 杨传明. 中国工业生态水平动态变化及行业分类研究[J]. 企业经济, 2018, (10): 11-18.
Yang Chuanming. Study on dynamic change of industrial ecology level and industry classification in China[J]. Enterprise Economy, 2018, (10): 11-18.

[13] 杨志杰. 控制员工总量, 调整员工结构, 提升运营效率[J]. 现代国企研究, 2018, (10): 81.
Yang Zhijie. Controlling the total number of employees, adjusting the structure of employees and improving operational efficiency[J]. Modern SOE Research, 2018, (10): 81.

[14] 杨金焕. 光伏系统能量偿还时间的分析[J]. 上海节能, 2010, (1): 11-14.
Yang Jinhuan. Analysis of the Energy Pay Back Time of photovoltaic System[J]. Shanghai Energy Conservation, 2010, (1): 11-14.

[15] 黄辉, 陈淑琴. 舟山海域风力分布特征分析[J]. 海洋预报, 2006, 23(1): 76-80.
Huang Hui, Chen Shuqin. Analysis of wind distribution characteristics in Zhoushan sea area[J]. Marine Forecast, 2006, 23 (1): 76-80.

[16] 代元军, 汪建文, 温彩凤, 等. 利用 WAsP 软件对风力机发电量的预测[J]. 可再生能源, 2011, 29(1): 103-106.
Dai Yuanjun, Wang Jianwen, Wen Caifeng, et al. The forecast of energy production of wind turbine based on WAsP[J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(1): 103-106.

[17] 何如, 黄梅丽, 罗红磊, 等. 近五十年来广西海岛的气候变化与气象灾害特征分析[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(2): 31-35, 39.
He Ru, Huang Meili, Luo Honglei, et al. Characteristic analysis of the climate change and the meteo-rological disasters of Guangxi's island during recent 50 years[J]. Journal of Meteorological Researchand Application, 2015, 36(2): 31-35, 39.

Pre-installation assessment of small island wind turbines based on multi-scenario life cycle assessment

MO Qiu-yun[1, 2], LIAO Zhi-qiang[1], LIU Wei-hao[2], JIANG Li[2], GUAN Hui-sen[2], HE Sheng-wen[1]

(1. College of Marine Information Engineering, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin 541004, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin 541004, China)

Received: Jul. 23, 2019

Key words: island wind power; life cycle assessment of small island wind turbines; life cycle scenario of small island wind turbines; energy payback time

Abstract: In order to accurately assess the green benefits of small- and medium-sized wind turbines on island wind power systems, this paper examines an island in the South China Sea (hereafter, “South”) and another in the East China Sea (hereafter, “East”) and applies life cycle assessment (LCA) technology. Based on multi-scenario factor analysis and energy payback time (EPBT), the two installation site results are assessed for their wind turbine energy potential. The key to the evaluation is the use of a GaBi software balance module to calculate the total energy consumption over the wind turbine life cycles. In the absence of scenario factors, the total energy consumption is 2 331.36 MJ (South) and 2 372.83 MJ (East). Under multi-scenario factors, the total energy consumption is 2 110.01 MJ (South) and 2 151.03 MJ (East). The power characteristics of the turbines at different wind speeds are obtained via experimentation. The annual power output of the turbines after installation on the islands is 276.45 kWh (South) and 304.96 kWh (East), obtained via the probability theory solution method. According to the EPBT payback formula, the no-scenario factor payback time is 2.34 a (South) and 2.16 a (East), while multi-scenario factor payback time is 2.12 a (South) and 1.96 a (East). The results show that scenario factors are introduced into the evaluation process, rendering the green benefit evaluation of the wind turbine more accurate. The evaluation can provide a reference for the installation site selection of small-scale fans on islands, thus avoiding an unnecessary waste of resources.

(本文编辑：刘珊珊)