

40.5 kV C-GIS全生命周期内碳排放计算与分析

游一民¹, 彭振搏¹, 戴冬云¹, 桑仲庆¹, 骆虎², 贾一凡², 赵彤¹

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710075)

摘要: 中国一直高度关注气候变化对国家和社会的影响,并积极推进碳减排的工作。40.5 kV箱式气体绝缘金属封闭开关设备(C-GIS)因其内部充有SF₆气体,其碳排放计算对指导电力设备碳排放计算与分析具有较强参考价值。因而文中针对40.5 kV C-GIS,考虑其原材料获取、生产制造、运输、使用以及回收利用五个阶段,参考生命周期碳排放评价方法,采用排放因子法核算其生命周期的碳排放总量,对每一个阶段的碳排放量进行分析,发现SF₆在其生命周期内碳排放量占比大,占总排放量的57.5%;在其生命周期内各个阶段,使用阶段产生的碳排放量占比最大,占其总排放量的92.6%。此方法为40.5 kV C-GIS生命周期的减排方案提供参考依据,也为其他类型的电力设备碳排放计算与分析提供参考。

关键词: C-GIS; 碳足迹; 生命周期评估

Calculation and Analysis of Carbon Emission in the Whole Life Cycle of 40.5 kV C-GIS

YOU Yimin¹, PENG Zhenbo¹, DAI Dongyun¹, SANG Zhongqing¹, LUO Hu², JIA Yifan², ZHAO Tong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: China has highly concerned about the impact of climate change on the country and society, and has actively promoted the work of carbon emission reduction. The carbon emission calculation of 40.5 kV box type gas insulated metal enclosed switchgear(C-GIS for short)with SF₆ gas has a strong reference for guiding the carbon emission calculation and analysis of power equipment. Therefore, for 40.5 kV C-GIS in this paper, total carbon emission of its life cycle is calculated by using emission factor method with consideration of such five stages as raw material acquisition, manufacturing, transportation, use and recycling and also with reference of the life cycle carbon emission evaluation method. The carbon emission in each stage is analyzed, finding that SF₆ accounts for a large proportion of carbon emission in its life cycle, accounting for 57.5% of the total emission. In various stages of its life cycle, the use stage accounts for the largest proportion of carbon emissions, accounting for 92.6% of its total emissions. This method provides a reference basis for the emission reduction scheme of 40.5 kV C-GIS life cycle, and also provides a reference for the calculation and analysis of carbon emission of other types of power equipment.

Key words: C-GIS; carbon footprint; life cycle assessment

0 引言

随着世界上各国的工业化程度不断提高,较高的能源消耗引起大气中CO₂等温室气体浓度的增加,从而使温室效应日趋严重。国际标准ISO

14040—2006^[1]和ISO 14044—2006^[2]为此提供了生命周期评价基本框架和原则及技术要求,对于产品层面碳足迹核算,国际上广泛运用的标准为: PAS 2050—2008, GHG protocol(2011)和ISO 14067—2012^[3]。其中, PAS 2050—2008 是第一个产品碳足迹核算标准,已

收稿日期:2022-04-20; 修回日期:2022-06-27

基金项目:广东正超电气有限公司资助项目(环保型环网柜的仿真与优化)。

Project Supported by Guangdong Zhengchao Electric Co., Ltd.(Simulation and Optimization of Environment-friendly Ring Network Cabinet).

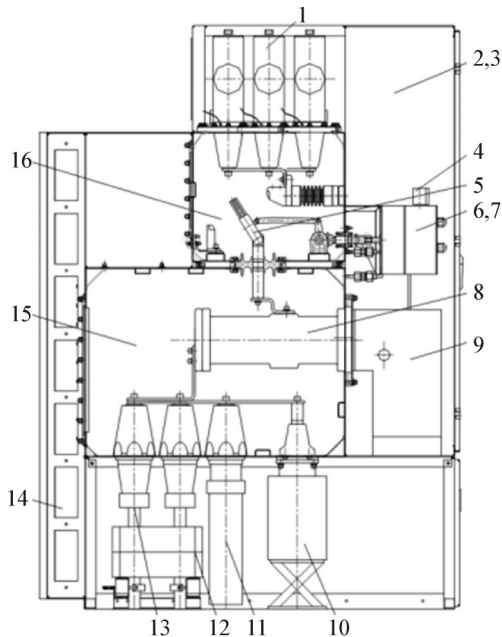
经被世界范围内很多公司所应用^[4]。

在碳足迹核算中,成套开关设备全生命周期各个阶段的电能损耗为整个碳排放的主要部分,但是对于GIS来说,最不容忽视的是SF₆气体排放所造成的温室效应,而SF₆气体具有优异的灭弧性能,其灭弧效果是空气的100倍,广泛应用于气体绝缘金属封闭开关设备中,但是其温室效应为CO₂气体的23 900倍,且可以稳定存在于大气中3 200年,因此在整个碳足迹核算过程中明确SF₆气体排放影响具有十分重要的意义^[5-6]。

文中以40.5 kV箱式气体绝缘金属封闭开关设备(C-GIS)的碳足迹为研究计算,确定系统边界^[6],将产品整个生命周期各阶段的碳排放量利用计算公式进行核算,建立适用于成套开关设备的碳排放核算方法,并对评估结果的影响因素进行分析。其分析结果具有针对性、细腻性的优点,适合于如开关设备等具体设备在内的微观系统的碳足迹核算。

1 40.5 kV C-GIS主要参数

某额定电压为40.5 kV,额定电流为1 250 A C-GIS产品,使用寿命20年,其结构见图1。该产品外形尺寸600 mm×1 650 mm×2 060 mm。



1—母线; 2—仪表室; 3—柜体; 4—密度传感器; 5—三位置隔离开关; 6—三位置隔离开关操动机构; 7—控制和保护单元; 8、9—真空断路器及其操动机构; 10—电压互感器; 11—ZnO避雷器; 12—电流互感器; 13—电缆终端; 14—泄压通道; 15—下充气壳体; 16—下充气壳体。

图1 产品结构示意图

Fig. 1 Product structure diagram

产品其他相关信息满足下列要求:充气壳体内部必须清洁、干燥,设计压力为0.07 MPa。充气隔室

SF₆气体额定充气压力为0.04 MPa,最高工作压力为0.06 MPa,补气报警压力为0.02 MPa,最低功能压力为0.01 MPa。当压力降至0.02 MPa时,应发出信号,并应通过充气口及时补气;在正常情况下各隔室SF₆气体的漏气率为每年≤0.5%。每面柜体主回路电阻应符合各自的规定值,主回路电阻不得大于120 μΩ。

2 40.5 kV C-GIS碳足迹计算

2.1 系统边界的确定

原材料获取阶段应包含金属材料、绝缘材料以及绝缘气体介质SF₆气体等所有原材料的整个获取过程;生产制造阶段包括了各系统中的每个主要零部件的制造、安装、测试以及各工序间衔接等过程,还包括初步组装将供货商所在地的制造部件运输到装配处等过程;运输阶段包括了产品从原材料到最终回收利用生命周期各阶段运输距离之和;使用阶段包含了该产品在正常寿命下的使用过程,除了正常使用下的电能损耗,还包括SF₆气体可能会出现泄漏情况;回收利用阶段除了包括从得到报废产品通过破碎、分选、检测得到可回收利用零部件或者材料之外,还需将SF₆气体进行回收利用。

2.2 原材料获取阶段计算

在原材料获取阶段主要考虑以下3个方面:金属材料、绝缘材料以及绝缘气体介质SF₆气体,需核算生产这些原材料消耗的电能以及温室气体排放。根据企业调研所得清单数据(BOM),结合相关软件数据库以及中国当前公布的研究成果或文献中相关数据见表1^[7-19]。

SF₆总量可根据气室容积得出,充有SF₆气体气室的体积约为整体产品尺寸的0.3~0.4,本计算取值为0.35。因该成套开关设备尺寸为600 mm×1 650 mm×2 060 mm,故充有SF₆气体的气室体积约为0.6 m×1.65 m×2.06 m×0.35=0.72 m³。

由于充有的SF₆气体额定压力(20 ℃、表压)为0.04 MPa,温度(环境温度+273)为293 K,理想气体常数为8.3 J·K⁻¹·mol⁻¹,根据克拉伯龙方程 $PV=nRT$ 可求得SF₆气体摩尔数 $n=11.74$ mol,则SF₆气体摩尔质量为0.146 06 kg/mol,故在整个气室中SF₆气体总量为1.72 kg。

生产原材料的碳排放现基于各种材料的消耗量进行逆向核算该环节的碳排放,核算结果见表1,主要公式为

$$E_{m1} = M_i \times EF_i \quad (1)$$

式(1)中: E_{m1} 为原料获取阶段碳排放总量,千克CO₂当量(kgCO₂e); M_i 为生产活动中消耗的第*i*类材料

表1 主要材料参数及其碳排放量

Table 1 Main material parameters and carbon emissions

参数	材料	总质量/kg	排放因子/(kgCO ₂ e·kg ⁻¹)	可回收率/%	碳排放量/(kgCO ₂ e·kg ⁻¹)
绝缘材料	环氧树脂	56.05	4.57	—	256.44
	橡胶	0.74	1.64	—	1.21
	陶瓷	1.88	1.11	—	2.09
	四氟	0.08	2.01	10.0	0.16
	尼龙	0.06	9.49	10.0	0.51
	ABS塑料	3.56	17.98	30.0	64.11
金属材料	钢	79.65	1.97	85.0	156.92
	铜	155.52	1.04	98.5	161.12
	铝合金	1.73	10.27	80.0	17.78
	不锈钢	123.02	4.60	100.0	565.87
	结构钢	326	2.18	85.0	710.68
	氧化锌	5.97	3.38	95.0	20.18
绝缘气体介质	SF ₆	1.72	9.15	99.0	15.74
总计	—	755.98	—	—	1 972.81

实物量, kg; EF_i 为第*i*类材料排放因子, kgCO₂e/kg。

2.3 生产制造阶段

2.3.1 零部件电能的损耗

各系统每个主要零部件的制造、安装、测试、传送以及各工序间接接等过程的电能消耗主要包括: ①该成套开关设备整个安装流程以及其安装过程中所消耗的电能; ②该成套开关设备整个测试流程以及其测试过程中消耗的电能。根据工厂实际情况, 该型成套开关设备生产制造阶段两部分的耗电总量约 1 075 kWh, 根据《全国碳排放权交易企业碳排放补充数据核算报告模板》要求核算, 采用全国电网平均排放因子 0.610 1 tCO₂/MWh^[20]。

生产制造阶段的碳排放现基于该过程总耗电量进行逆向核算, 主要公式为

$$E_{p1} = E_i \times EF_{i2} \quad (2)$$

式(2)中: E_{p1} 为生产阶段产品制造过中所消耗的能源产生的温室气体排放量, kgCO₂e; E_i 为生产阶段所消耗的电能, kWh; EF_{i2} 为全国电网平均排放因子。故生产阶段产品制造过程中所消耗的能源产生的温室气体排放量为 $E_{p1} = 1\ 075 \times 0.610\ 1 = 655.86\ \text{kgCO}_2\text{e}$ 。

2.3.2 SF₆气体排放

40.5 kV C-GIS中充有SF₆气体, 在该设备生产制造阶段明确生产SF₆气体以及安装充气时的泄漏排放, 获取SF₆气体泄漏排放后, 不同种类温室气体排放量, 计算完成后需依据全球增温潜势值(GWP)进行二氧化碳当量单一指标的转化, 根据IPCC可知

SF₆气体GWP为23 900。

SF₆生产泄漏排放为生产排放因数与设备制造商的气体消耗总量的乘积, 采用的排放因数只应用于SF₆气体处理过程, 与温室效应因数无关, 见表2^[21]。

表2 排放因数表

Table 2 Emission factor table

设备	生命阶段		
	生产	使用	寿命结束
中压设备	0.070	0.02×使用寿命	0.93
高压设备	0.085	0.026×使用寿命	0.95

由于40.5 kV C-GIS属于中压开关设备, 排放因数取0.07, 因此SF₆生产泄漏排放=0.07×设备制造商的气体消耗总量。气室中所需SF₆气体总量为1.72 kg, 则设备制造商的气体消耗总量为: 1.72 kg/(1-0.07)=1.85 kg, SF₆生产泄漏排放=0.07×1.85=0.13 kg。

该阶段的SF₆气体泄漏排放现基于该过程总排放量进行逆向核算, 主要公式为

$$E_{p2} = GWP(\text{SF}_6) \times \text{SF}_6\text{生产泄漏排放} \quad (3)$$

式(3)中, E_{p2} 为原材料获取阶段生产SF₆气体排放的温室气体排放量, kgCO₂e, $E_{p2} = 23\ 900 \times 0.13 = 3\ 107\ \text{kgCO}_2\text{e}$ 。 $E_p = E_{p1} + E_{p2} = 655.86 + 3\ 107 = 3\ 762.86\ \text{kgCO}_2\text{e}$, E_p 为原材料获取阶段产生的全部碳排放量, kgCO₂e。

2.4 运输阶段

该成套开关设备从工厂运输到消费者所在地, 所有重量是基于部件计算的, 含外包装、辅助等东西, 因此总重量大于总原材料质量, 通过企业调研

所得数据以及部分假设,得到该型成套开关设备主要运输阶段的数据,利用柴油叉车运输的距离为9 km,利用柴油货车运输的距离为1 689 km。

目前市场上常用柴油叉车耗油量为0.23 L/km,柴油货车耗油量为0.12 L/km。因此,柴油叉车耗油量 $L_{11}=9 \times 0.23=2.07$ L,柴油货车耗油量 $L_{12}=1\ 689 \times 0.12=202.68$ L,根据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》(IPCC 2006)收录的各种燃料CO₂排放系数可知柴油的生产排放因子 EF_{13} 为2.73 kgCO₂/L^[22],运输阶段的碳排放现基于该过程总耗油量进行逆向核算,主要公式为

$$E_1 = E_{11} + E_{12} = L_1 \times EF_{13} \quad (4)$$

式(4)中: E_1 为产品运输过程中所消耗的能源产生的温室气体排放量,kgCO₂e; E_{11} 为运输过程叉车所消耗的能源产生的温室气体排放量,kgCO₂e; E_{12} 为运输过程货车所消耗的能源产生的温室气体排放量,kgCO₂e; EF_{13} 为柴油的生产排放因子。 $E_{11}=L_{11} \times EF_{13}=2.07 \times 2.73=5.65$ kgCO₂e; $E_{12}=L_{12} \times EF_{13}=202.68 \times 2.73=405.36$ kgCO₂e; $E_1=E_{11} + E_{12}=5.65 + 405.36 = 411.01$ kgCO₂e。

2.5 使用阶段

在运行阶段的电能损耗有以下两个方面:一是主回路功率损耗;二是机械操作造成的电能损耗。对40.5 kV C-GIS,还需考虑参考其使用年限内泄漏到空气中的SF₆绝缘气体介质。

2.5.1 电能损耗计算

电能损耗核算包括操作机构损耗与负载回路损耗,而负载回路功率损耗是依据生产制造商称的设备功率损耗,其中成套设备电流回路中的功率损耗与主回路的额定电流以及每一个主回路的载荷率有关,故一个回路的平均功率损耗就是回路承载时的功率损耗与使用时间率乘积。

通过型式试验可得电流通路电阻,进而可得电能损耗 E_1 (kWh),其公式为

$$E_1 = R \times (A \times I_r)^2 \times H \quad (5)$$

式(5)中: R 为电流通路的电阻(在型式试验中测得), Ω ; I_r 为额定持续电流,kA; A 为负载率; H 为参考使用寿命,h。

由于文中电能损耗数据由调研数据可知,因此可直接采用调研数据进行计算。该阶段以额定电流1 250 A计算开关功耗约0.4 kW,运行寿命为20年。最终电能损耗为 $E=0.4 \times 20 \times 365 \times 24 = 70\ 080$ kWh。

使用阶段电能损耗的碳排放量为

$$E_{u1} = EF_{12} \times E \quad (6)$$

式(6)中: E_{u1} 为运行时间内使用电能所产生的碳排放量,kgCO₂e; E 为调研使用阶段运行时间内的耗

电量,kWh; EF_{12} 为全国电网平均排放因子。计算使用阶段电能损耗的碳排放量为 $E_{u1}=0.610\ 1 \times 70\ 080 = 42\ 755.81$ kgCO₂e。

2.5.2 SF₆气体泄漏排放量的计算

使用阶段SF₆气体泄漏排放量具体包括生产中充入SF₆气体存在的潜在泄漏;运维过程因SF₆泄漏而补充的SF₆气体;泄漏排放采用的最大允许的绝对泄漏率。该阶段泄漏排放量可使用排放因数进行计算,具体计算方法:设备使用排放量=使用排放因数×设备气室SF₆气体总量。使用阶段的排放因数见表2,该排放因数处理了在使用过程中的所有排放,包括泄漏排放、维修排放以及任何失败造成的排放。

根据排放因数的核算结果SF₆气体使用阶段泄漏排放为 $0.02 \times 20 \times 1.72 = 0.69$ kg。

$$E_{u2} = GWP(SF_6) \times SF_6 \text{使用泄漏排放} \quad (7)$$

式(7)中, $E_{u2}=23\ 900 \times 0.69 = 16\ 491$ kgCO₂e, E_{u2} 为使用阶段泄漏所产生的碳排放量,kgCO₂e。 $E_u = 42\ 755.81 + 16\ 491 = 59\ 246.81$ kgCO₂e; E_u 为使用阶段产生的全部碳排放量,kgCO₂e。

2.6 回收阶段

进行回收时要根据实际情况对开关产品的零部件采取相应的回收方式,各材料回收率(见表1)。回收利用阶段需明确回收过程所消耗的电能以及可回收利用材料的实物量,进行回收利用,以减少碳排放量。根据实际调研情况,测定该阶段耗电约100 kWh。

2.6.1 SF₆气体排放及回收

SF₆气体在寿命结束阶段可能会被使用者将全部气体排放到大气中,由于SF₆气体温室效应是CO₂的23 900倍,我国明确要求进行回收利用,因此需尽可能回收利用SF₆气体,为减少其温室效应影响^[23]。目前回收设备利用带负压回收装置效果最好,回收率可达99%以上,采用该装置可有效回收利用SF₆气体^[24]。

计算时从两个方面进行考虑:

1)因用户的误操作将SF₆气体完全排放到大气中是最为严重后果。此种情况寿命结束排放量为寿命结束排放因数与充入SF₆气体总量的乘积,寿命结束时,SF₆排放量为 $0.93 \times 1.72 = 1.60$ kg。SF₆碳排放量= $23\ 900 \times 1.60 = 38\ 240$ kgCO₂e。

2)将SF₆气体进行有效回收利用,且回收率为99%,则CO₂排放量会减少37 857.6 kg。可减少SF₆气体碳排放量= $23\ 900 \times 1.60 \times 99\% = 37\ 857.6$ kgCO₂e,回收过程SF₆气体碳排放量为382.4 kgCO₂e。

2.6.2 材料循环利用

材料循环利用需消耗电能, 根据实际调研情况, 测定该阶段能耗约 100 kW, 电能损耗所造成的碳排放核算公式为

$$E_y = E_{i2} \times EF_{i2} \quad (8)$$

式(8)中: E_y 为回收过程中所消耗的电能产生的温室气体排放量, kgCO_2e ; E_{i2} 为调研回收阶段的耗电量, kWh ; EF_{i2} 为全国电网平均排放因子; 电能损耗所造成的碳排放为 $E_y = 100 \times 0.610 = 61.01 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

除此之外, 回收利用这些材料可以有效减少该开关产品全生命周期的碳排放量, 产品的材料回收利用率已在表 1 中列出, 材料可循环物质量为回收利用率与材料总量的乘积, 故各种材料可循环物质量及可减少碳排放量计算式为

$$E_c = M_{ir} \times EF_{ir} \quad (9)$$

式(9)中: E_c 为回收材料过程有效减少的碳排放量, kgCO_2e ; M_{ir} 为可回收利用的第 i 类材料实物量, kg ; EF_{ir} 为可回收利用的第 i 类材料排放因子, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ 。

整个回收过程中的碳排放量 E_r 为 $E_r = E_y - E_c = 61.01 - 1515.43 = -1454.42 \text{ kgCO}_2\text{e}$ 。

设备材料回收利用结果见表 3。

表 3 设备材料回收利用

Table 3 Recycling of equipment and materials

参数	材料	可回收质量/kg	排放因子/ ($\text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kg}^{-1}$)	可减少碳排放量/ kgCO_2e
绝缘材料	环氧树脂	—	4.56	—
	橡胶	—	1.64	—
	陶瓷	—	1.12	—
	四氟	0.008	2.01	0.016
	尼龙	0.006	9.49	0.057
	ABS塑料	1.07	17.98	19.24
金属材料	钢	67.71	1.97	133.39
	铜	153.19	1.04	159.32
	铝合金	1.39	10.27	14.27
	不锈钢	123.02	4.60	565.89
	结构钢	277.10	2.18	604.08
	氧化锌	5.67	3.38	19.17
	总计	—	630.84	—

2.7 40.5 kV C-GIS 碳足迹总量

该开关设备的碳足迹总量, 应为生命周期各个阶段的碳排放量总和, 即原料获取、生产制造、使用、运输、回收阶段所有碳排放的总和。

利用从企业调研的活动水平数据和碳排放相

关基础数据, 依据开关设备生命周期主要阶段碳排放计算公式, 可以得出开关设备生命周期主要阶段的 CO_2e 排放量见表 4 及图 2。

表 4 全生命周期碳排放量

Table 4 Life cycle carbon emissions

某型开关设备	碳排放量/ kgCO_2e	比例/%
原材料阶段	1972.81	3.1
生产制造阶段	3762.86	5.9
运输阶段	411.01	0.6
使用阶段	59246.81	92.6
回收利用阶段	-1454.42	-2.2
总计	63939.07	100.0

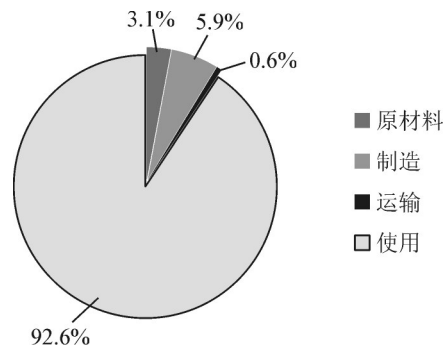


图 2 全生命周期碳排放量

Fig. 2 Life cycle carbon emissions

3 碳排放评估分析

通过对成套开关设备碳足迹进行核算发现造成温室效应最大的两个因素为全生命周期的电能损耗与 SF_6 气体绝缘介质排放。基于以上的核算可知, 总电能损耗包括生产制造零部件电能损耗、使用阶段电能损耗以及回收利用阶段电能损耗。

而 SF_6 气体总排放量包括生产泄漏排放、使用设备的排放以及回收处理排放, 其中, 考虑到因误操作可能将 SF_6 气体绝缘介质全部排放到大气中的情况, 将评估结果进行分析, 其结果见表 5, 即电能损耗与 SF_6 气体排放等效碳排放量结果。可知 SF_6 气体绝缘介质排放如果没有进行有效回收利用将会产生严重的温室效应。

表 5 等效碳排放量表

Table 5 Main technical parameters

某型开关设备	电能损耗/ kWh	比例/%
电能损耗	42755.81	42.5
剩余 SF_6 气体排放	37857.60	37.6
全生命周期 SF_6 气体排放	19988.22	19.9
总计	100601.63	100.0

4 结论

1)该成套开关设备全生命周期碳足迹核算中, SF₆在其生命周期内碳排放量占比大, 占总排放量的57.5%左右, 使用阶段电能损耗以及SF₆气体泄漏排放所造成的碳排放占主要部分, 所占权重为92.6%, 其他依次是生产制造阶段5.9%, 原材料获取阶段3.1%, 运输阶段0.6%。

2)回收阶段可以减少产品生命周期内温室气体的排放。回收阶段能源消耗也会导致CO₂e排放, 但通过对开关零部件或材料的回收利用, 减少了产品生命周期内1 454.42 kg的CO₂e排放, 回收利用SF₆气体可减少37 857.6 kgCO₂e排放。

3)文中所总结的开关成套设备碳足迹核算方法为衡量未来排放量、制定减排方案提供了一个方案。相关评估流程和实施方案可推广至其他类型开关设备的碳排放评估。目前所存在的不足为选定的系统边界尚且存在未考虑到的因素, 核算结果仅作为参考, 后期的工作应致力于完善系统边界, 精确核算结果。

致谢

文中得到广东正超电气有限公司项目组的大力支持和帮助, 提供了项目经费以及数据支撑, 在此深表感谢!

参考文献:

- [1] Environmental management-life cycle assessment-Principles and frameworks: ISO 14040—2006[S].2006.
- [2] Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines: ISO 14044—2006[S].2006.
- [3] 白伟荣, 王震, 吕佳. 碳足迹核算的国际标准概述与解[J]. 生态学报, 2014, 34(24):7486-7493.
BAI Weirong, WANG Zhen, LYU Jia. Overview and analysis of international standards for carbon footprint accounting[J]. Journal of Ecology, 2014, 34(24): 7486-7493.
- [4] 童庆蒙, 沈雪, 张露, 等. 基于生命周期评价法的碳足迹核算体系: 国际标准与实践[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(1):46-57.
TONG Qingmeng, SHEN Xue, ZHANG Lu, et al. Carbon footprint accounting system based on life cycle assessment: International standards and practices[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Science Edition), 2018(1): 46-57.
- [5] 李树德, 魏晓浩, 李依风. 电网企业SF₆气体排放核算的关键问题研究[J]. 能源与环境, 2016(5):20-22.

- LI Shude, WEI Xiaohao, LI Yifeng. Power grid enterprise SF₆ research on key issues of gas emission accounting[J]. Energy and Environment, 2016(5): 20-22.
- [6] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8):92-99.
FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8):92-99.
- [7] 王吉凯. 基于产品生命周期的碳排放计算方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
WANG Jikai. Research on carbon emission calculation method based on product life cycle[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [8] 胡健, 秦玉杰, 焦提操, 等. 泛在电力物联网环境下考虑碳排放权约束的VPP理性调峰模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3):49-57.
HU Jian, QIN Yujie, JIAO Ticao, et al. Rational peak shaving model of VPP considering carbon emission rights constraints in ubiquitous power internet of things environment [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3):49-57.
- [9] 李嘉琪, 李柏姝. 面向生命周期的燃料电池低碳优化设计[J]. 时代汽车, 2020(21):124-125.
LI Jiaqi, LI boshu. Life cycle oriented low carbon optimization design of fuel cell[J]. Times Automobile, 2020(21): 124-125.
- [10] 张伟, 向洪坤. 燃料电池汽车基本技术及发展综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(4):36-41.
ZHANG Wei, XIANG Hongkun. Review on basic technology and development of fuel cell vehicle[J]. Smart Power, 2020, 48(4):36-41.
- [11] 姜金龙, 徐金城, 寇昕莉. ABS工程塑料的生命周期评价研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2006(2):59-63.
JIANG Jinlong, XU Jincheng, KOU Xinli. Study on life cycle assessment of ABS engineering plastics[J]. Journal of Zhengzhou University (Science Edition), 2006(2): 59-63.
- [12] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. 当代经济管理, 2021, 43(8): 33-38.
GAO Chunyan, NIU Jianguang, WANG feiran. Summary of carbon emission accounting methods and carbon emission factors in steel production stage[J]. Contemporary Economic Management, 2021, 43(8): 33-38.
- [13] 张文娟, 李会泉, 陈波, 等. 我国原铝冶炼行业温室气体排放模型[J]. 环境科学研究, 2013, 26(10):1132-1138.
ZHANG Wenjuan, LI Huiquan, CHEN Bo, et al. Greenhouse gas emission model of China's primary aluminum smelting industry[J]. Environmental Science Research, 2013, 26(10): 1132-1138.

- [14] 胡 勇. 汽车产品生命周期碳排放探讨[J]. 质量与认证, 2014(4):56-57.
HU Yong. Discussion on life cycle carbon emission of automobile products[J]. Quality and Certification, 2014(4): 56-57.
- [15] 姜子英, 潘自强, 邢 江, 等. 中国核电能源链的生命周期温室气体排放研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3502-3510.
JIANG Ziyong, PAN Ziqiang, XING Jiang, et al. Study on life cycle greenhouse gas emissions of China's nuclear power energy chain[J]. China Environmental Science, 2015, 35 (11): 3502-3510.
- [16] 赵艺伟, 左海滨, 余雪峰, 等. 钢铁工业二氧化碳排放计算方法实例研究[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(1): 34-40.
ZHAO Yiwei, ZUO Haibin, SHE Xuefeng, et al. Case study on calculation method of carbon dioxide emission in iron and steel industry[J]. Nonferrous Metals Science and engineering, 2019, 10(1): 34-40.
- [17] 杨丽菊, 濮永许. 高氟氯低品位氧化锌粉的处理技术研究[J]. 云南冶金, 2018, 47(3):57-61.
YANG Liju, PU Yongxu. Study on treatment technology of high fluorine and chlorine low-grade zinc oxide powder[J]. Yunnan Metallurgy, 2018, 47(3): 57-61.
- [18] 葛 鑫, 赖 麒, 姜 维, 等. 聚碳酸酯新型生产工艺的生命周期评价[J]. 内蒙古科技大学学报, 2019, 38(4):404-408.
GE Xin, LAI Qi, JIANG Wei, et al. Life cycle assessment of new polycarbonate production process[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019, 38 (4): 404-408.
- [19] 刘 诚, 陈瑞英, 王满仓, 等. 铜冶炼能耗核算与碳排放量核算差异性和相关性分析[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4):1-6.
LIU Cheng, CHEN Ruiying, WANG Mancang, et al. Analysis on the difference and correlation between copper smelting energy consumption accounting and carbon emission accounting[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 1-6.
- [20] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源—荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10):1-11.
CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (10):1-11.
- [21] WARTMANN S, HARNISCH J. Reductions of SF₆ emissions from high and medium voltage electrical equipment in Europe[C]//International Symposium on Non-CO₂ Greenhouse Gases(NCGG-4): Science, Control, Policy and Implementation. Utrecht (NL):[s.n.], 2005: 397-404.
- [22] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R]. [S.l.]: IPCC, 2006.
- [23] 李志刚, 蔡 巍, 李 帆. 六氟化硫气体的全寿命周期管理[J]. 华北电力技术, 2016(5):29-34.
LI Zhigang, CAI Wei, LI Fan. Life cycle management of sulfur hexafluoride gas[J]. North China Electric Power Technology, 2016(5): 29-34.
- [24] 张建飞, 陆 静, 刘朋亮, 等. SF₆气体循环利用技术的发展与应用[J]. 电气时代, 2021(5):36-38.
ZHANG Jianfei, LU Jing, LIU pengliang, et al. SF₆ development and application of gas recycling technology[J]. Electrical Age, 2021(5): 36-38.

游一民(1963—),女,博士,教授级高级工程师,研究方向为智能电器、高压开关设备仿真及设计等(E-mail: youyimin@126.com)。

彭振搏(1999—),男,硕士研究生,研究方向为电器智能化技术应用(通信作者)(E-mail: 1336929693@qq.com)。