

绿色低碳发展下电工装备产品碳足迹评价方法研究

赵 扉¹, 王曦冉², 沈 梁¹, 陈 艳³

¹国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州

²国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州

³国网英大碳资产管理(上海)有限公司, 上海

收稿日期: 2022年8月30日; 录用日期: 2022年9月10日; 发布日期: 2022年9月22日

摘 要

本文重点探讨在绿色低碳发展趋势下, 针对电网企业供应链上游电力设备制造企业产品碳足迹评价方法。基于IPCC理论、全生命周期评价方法和碳足迹相关标准, 结合电网企业实际情况, 支撑电网企业设计电力设备产品碳足迹评价方法, 并以110 kv变压器为例进行碳足迹评价应用, 助力电网企业提升绿色水平, 引领上下游共同实现绿色发展。

关键词

产品碳足迹, 全生命周期, 变压器, 供应链

Research on Carbon Footprint Evaluation Method of Power Equipment Products under Green and Low-Carbon Development

Fei Zhao¹, Xiran Wang², Liang Shen¹, Yan Chen³

¹State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²Economic and Technological Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

³State Grid Yingda Carbon Asset Management (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai

Received: Aug. 30th, 2022; accepted: Sep. 10th, 2022; published: Sep. 22nd, 2022

Abstract

This paper focuses on the green and low-carbon development trend, aiming at the upstream pow-

er equipment manufacturing enterprises in the power grid enterprise supply chain product carbon footprint evaluation method. Based on the theory of the IPCC, the whole life cycle assessment and carbon footprint related standard, in combination with the practical situation of power grid enterprises, supporting power grid enterprise design power equipment product carbon footprint assessment method, as a case study of 110 kV transformer carbon footprint assessment application, power grid enterprises enhance the level of green and lead the work to realize green development of upstream and downstream.

Keywords

Product Carbon Footprint, Full Life Cycle, Transformer, Supply Chain

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业化进程加快,资源浪费和生态破坏问题日益严重。自“碳达峰、碳中和”目标提出以来,减少温室气体排放、探索绿色低碳转型发展道路成为社会关注的焦点。电网企业是首要能源消耗企业,在推进清洁能源应用、助力碳减排方面离不开技术先进、节能环保的电力设备保障,需要物资供应链充分发挥产业协同作用,向上对接电工装备制造企业,向下保障物资供应及电网发展需要。电力设备碳排放是供应链碳排放的重要组成部分,电工装备的生产、使用、及废弃等环节过程中的环境保护、资源节约程度将直接影响到电网企业碳排放量,从而影响到供应链全链绿色发展进程。产业链供应链要实现“碳中和”,不仅要严把产品质量关,更要摸清电力设备全生命周期碳排放,挖掘电力设备的减碳潜力,全面推动上下游绿色转型。电网企业应发挥核心企业带头作用,将绿色采购理念融入到经营管理、采购过程中,不仅要保障电力设备运行低碳化,还要关注上游产品制造等全过程低碳化。本文通过探索电力设备制造商碳足迹评价方法,帮助电网企业识别电工装备产品全生命周期的碳减排机会,挖掘供应链减碳潜力,推动供应链绿色管理升级,助力电网企业迈向绿色低碳未来。

2. 理论与标准分析

2.1. 相关理论研究

1) 生命周期评价方法

生命周期是指某一产品从原材料获取、制造、使用到废弃的整个生命过程。生命周期评价方法(Life cycle assessment, LCA)也叫过程分析法或排放系数法,应用于评估产品全生命周期内,所有能源消耗和对环境产生的潜在影响的方法。LCA的计算原理是基于质量平衡方程来保证产品全生命周期所涉及到的所有流入、累计和流出达到平衡,通过统计产品各环节温室气体排放的平均值,加权乘以对应排放系数得到温室气体排放量[1]。其基本公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n Q_i \times C_i .$$

其中 E 表示为某产品碳足迹, Q_i 表示为 i 物质或活动的度量(质量/体积/电能/重量等), C_i 为该物质碳排放系数(CO_2)。

2) IPCC 理论

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)是政府间气候变化专门委员会,是由联合国与世界气象组织联合成立的,致力于研究全球气候变化的重要科研机构。在《2006年 IPCC 国家温室气体清单指南》能源卷中,IPCC 首次针对能源消费的碳排放量进行测算,并提出了碳排放量核算理论——排放因子法(IPCC 法)。其基本原理是在特定排放源的基础上,通过对该碳源的消耗量与其对应的碳排放系数的乘机获取该碳源的碳排放量,其中碳排放系数是指某资源活能源消耗或经济产出所转化的温室气体量,由 IPCC 提供,通常以吨为单位。温室气体通常按照其对气候影响程度,通过标准煤系数统一转化为二氧化碳进行计算。IPCC 法计算方法简便,在产业范围应用较为广泛[2]。

2.2. 产品碳足迹标准

1) ISO14067 产品碳足迹标准

ISO14067 全称是“产品碳足迹”标准,由国际标准化组织环境管理技术委员会(ISO/TC207)发布。ISO14067 是以 ISO14040 和 ISO14044 为基础,专门只对与产品全生命周期的碳足迹评价标准。该标准提供了产品碳足迹基本要求和指导。ISO14067 中将产品碳足迹定义为基于全生命周期评估得到的特定产品体系中对温室气体排放的总和,以 CO₂ 作为温室气体当量。该标准中对产品碳足迹核算步骤与具体内容做了说明,分为目标与范围界定、清单分析、影响评价和结果解释四个步骤,被认为是更具普适性的标准[3]。

2) PAS2050

PAS2050 是目前全球范围内受到公认,最为完整且相对广泛应用的产品碳足迹国际标准。全称为《PAS2050: 2011: 如何核算产品碳足迹、识别热点和减少供应链的碳排放》,首版由英国标准协会(BSI)编制发布,是世界上首例针对产品碳足迹的核算标准。该标准主要应用于核算产品从原材料收集到加工生产、运输、市场分配、销售及使用、废弃处理的全生命周期中所产生的温室气体排放量。2011 出台 PAS2050 修订版,较 2008 年首版更具有针对性和适用性[4]。

3. 产品碳足迹评价方法设计

3.1. 设计思路

本文选定 110 kV 规格变压器作为碳足迹评估对象,通过确认 110 kV 变压器的原材料、生产制造工艺、成品运输信息以及使用到的相关设备及能源种类,并借鉴相关理论与案例,参考生命周期法及 IPCC 碳排因子计算方法,设计变压器产品碳足迹评估方法。该方法主要包括四个步骤:明确产品生产工艺流程、确定系统边界、制定数据收集清单、构建碳足迹计算模型。其中产品系统边界的制定基于产品生命周期理论,计算方法则是参考 IPCC 碳排放因子法。

3.2. 明确产品生产工艺流程

110 kV 规格变压器生产工艺的四大环节包括铁芯制作、线圈制作、引线装配和油箱及附件制作。剩余的器身装配、气相干燥、器身压服、总装配、注油及出厂试验等均为辅助装配类生产流程。具体生产工艺流程如图 1 所示。

3.3. 确定系统边界

系统边界决定了产品生命周期过程碳足迹计算范围以及数据收集范围。一般情况下,系统边界确定的关键原则是涵盖产品从设计、生产、制造、使用、回收处理所有阶段直接和间接的碳排放数据[5]。由于电网企业供应链具有制造端与使用端在外、且设备回收处置方式以拍卖为主的特点,本文中变压器的

核算边界不覆盖其使用及废弃回收阶段。结合产品过程生命周期理论及电网企业供应链特点，仅对变压器产品原材料及能源获取、生产制造与装配、成品运输等各生命周期阶段中产生的温室气体排放量进行量化与计算。

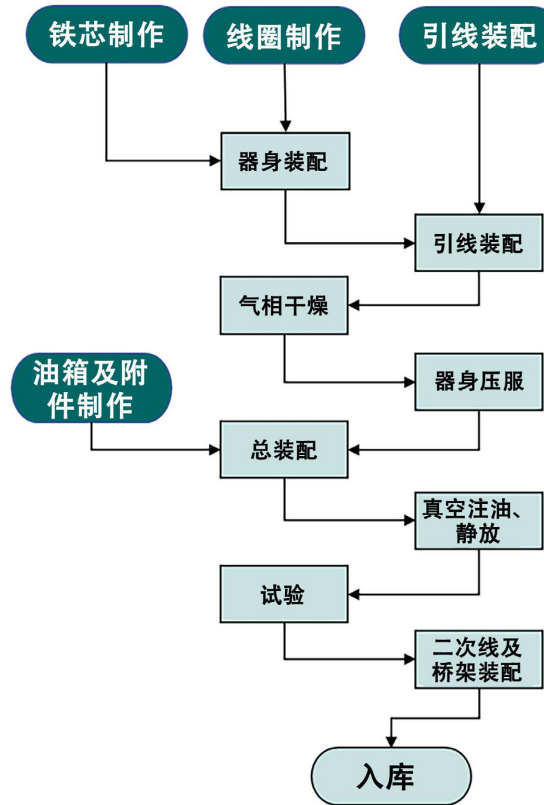


Figure 1. Transformer production flow chart
图 1. 变压器生产流程图

3.4. 制定数据收集清单

在产品碳足迹评估的系统边界确定后，即可进入数据收集清单的制定阶段。数据收集清单制定阶段包括清单设计与数据收集分析两个部分。

1) 设计数据收集清单

根据上述已确定的系统边界，明确需采集碳足迹数据的业务环节包括原材料、生产制造及装配过程和物流环节，对各环节所涉及的碳排放源进行梳理，编制数据收集清单。

a) 变压器原材料

变压器产品的原材料主要包括硅钢片、电磁线、绝缘件以及变压器油。各原材料均涉及加工及运输过程。据此确定各种原材料的碳排放源主要为原材料加工及原材料运输过程中产生的排放。由于变压器原材料涉及种类较多，且生产制造过程复杂，变压器供应商难以提供原材料排放数据。原材料排放数据将由原材料供应商直接填写，不再单独进行计算。具体核算清单及碳排放源如表 1 所示。

b) 变压器生产制造过程

变压器生产制造过程主要包括油箱及附件制作、铁芯制作、线圈制作、引线装配四大环节。此外，还包括器身装配、气相干燥、器身压服、总装配、注油及出厂试验等辅助装配类生产流程。

Table 1. Carbon footprint accounting list of raw materials**表 1.** 原材料碳足迹核算清单

| 业务环节 | 二级业务 | 碳排放源 |
|------|------|-------------|
| 原材料 | 硅钢片 | 硅钢片生产、运输排放 |
| | 电磁线 | 电磁线生产、运输排放 |
| | 绝缘件 | 绝缘件生产、运输排放 |
| | 变压器油 | 变压器油生产、运输排放 |

油箱及附件制作、铁芯制作、线圈制作、引线装配环节碳足迹核算清单如表 2 所示：

Table 2. Carbon footprint accounting list of major production processes**表 2.** 主要生产过程碳足迹核算清单

| 业务环节 | 二级业务 | 碳排放源 |
|------|---------|------|
| 生产过程 | 油箱及附件制作 | 电能 |
| | 铁芯制作 | 电能 |
| | 线圈制作 | 电能 |
| | 引线装配 | 电能 |

其余辅助装配类生产过程包括器身装配、气相干燥、器身压服、总装配、真空注油净放、出厂试验、入库、生产配套、公共能耗等环节，主要涉及电能的排放。如表 3 所示：

Table 3. Carbon footprint accounting list for the remaining production processes**表 3.** 其余生产过程碳足迹核算清单

| 业务环节 | 二级业务 | 碳排放源 |
|------|---------|--------------|
| 生产过程 | 器身装配 | 电能 |
| | 气相干燥 | 电能、煤油 |
| | 器身压服 | 电能 |
| | 总装配 | 电能 |
| | 真空注油、静放 | 电能 |
| | 出厂试验 | 电能 |
| | 入库 | 电能 |
| | 生产配套 | 行车、叉车、牵引设备用电 |
| | 生产公共能耗 | 用电、用水 |

c) 变压器物流运输过程

变压器的物流环节主要指成品运输过程，变压器产品主要为公路运输，消耗汽油[6]。如表 4 所示。

Table 4. Carbon footprint accounting list of logistics links**表 4.** 物流环节碳足迹核算清单

| 业务环节 | 二级业务 | 碳排放源 |
|------|------|----------|
| 物流环节 | 成品运输 | 成品公路配送过程 |

2) 收集能耗数据

在数据收集清单编制完成后, 根据核算清单所列碳排放源, 进行数据收集工作。其中, 原材料环节碳排放数据需由原材料供应商提供对应的原材料生产能耗数据及原材料运输到变压器厂家消耗的能耗数据。变压器生产过程中的用电能耗数据, 则是根据变压器的每道生产工艺对应的生产设备在该道工序使用的能耗数据。生产过程除变压器的制造工艺流程外, 还包含变压器出厂试验、入库、生产配套及生产公共能耗数据的收集。物流环节主要是变压器成品的运输环节, 数据主要为公路配送中消耗的汽油能耗。

3.5. 构建碳足迹计算模型

最后, 设计碳排计算公式。通过借鉴 IPCC 计算方法, 明确计算公式、排放因子和计算参数的取值范围。根据变压器碳足迹核算清单所列排放源, 按照标准计算方法, 为每一个碳排放源配置计算公式。

标准公式为: 各环节碳排放量 = 各环节的能源消耗量 × 对应能源的碳排因子。

以上为变压器产品在生产制造过程及成品物流过程中, 各环节碳排计算公式。公式中涉及的柴油、汽油、电力、水排放因子参数及出处, 如表 5 所示。

Table 5. Energy carbon emission factor parameters table

表 5. 能源碳排因子参数表

| 能源品类 | 排放因子 | 单位 | 备注 | 来源 |
|------|--------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 柴油 | 3.0959 | tCO ₂ /t | 1 升 = 0.00084 吨 | 《企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施(2022 年修订版)》 |
| 汽油 | 2.9251 | tCO ₂ /t | 1 升 = 0.00073 吨 | |
| 电力 | 0.5810 | tCO ₂ /MWh | 1 MWh = 10 ³ kWh | 《企业温室气体排放核算方法与报告指南发电设施(2022 年修订版)》 |
| 水 | 0.1891 | KgCO ₂ e/t | / | 碳交易网(2019)-建筑材料 |

4. 碳足迹评价方法应用

4.1. 数据采集

采集 2021 年供电网企业的每台 110 kv 变压器产品生产碳足迹数据, 具体如表 6 所示。

Table 6. Carbon footprint data collection table for the production of 110 kv transformer products

表 6. 110 kv 变压器产品生产碳足迹数据采集表

| 序号 | 业务环节 | 二级业务 | 碳排放源 | 能耗采集(每台) | | | |
|----|------|---------|----------|-------------|-------|--------|-------|
| | | | | 电(度) | 气(立方) | 油(升) | 水(立方) |
| 1 | 原材料 | 硅钢片 | 硅钢片生产、运输 | 142,970,000 | 0 | 12,000 | 0 |
| 2 | | 电磁线(铜线) | 电磁线生产、运输 | 7,350,000 | 0 | 1780 | 0 |
| 3 | | 绝缘件(纸板) | 绝缘件生产、运输 | 2,400,000 | 0 | 165 | 0 |
| 4 | | 变压器油 | 变压器油生产 | 50,300,000 | 0 | 2670 | 0 |
| 5 | 生产过程 | 油箱 | 电能 | 6,720,000 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | | 铁芯制作 | 电能 | 15,120,000 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | | 线圈制作 | 电能 | 6,240,000 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | | 引线装配 | 电能 | 520,000 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | | 器身装配 | 电能 | 100,000 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | | 气相干燥 | 电能、煤油 | 5,200,000 | 0 | 0 | 0 |

Continued

| | | | | | | | |
|----|-------------|---------|----------|-----------|---|-----|-----|
| 11 | | 器身压服 | 电能 | 1,000,000 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | | 总装配 | 电能 | 5,000,000 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | | 真空注油、静放 | 电能 | 6,000,000 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | | 出厂试验 | 电能 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | | 入库 | 电能 | 5,000,000 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | | 生产配套 | 电能 | 300 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | | 生产公共能耗 | 用电、用水 | 1,000,000 | 0 | 0 | 120 |
| 18 | 物流环节 | 成品运输 | 成品公路配送过程 | 0 | 0 | 380 | 0 |

4.2. 测算结果

经汇总 2021 年供给电网企业的 110 kv 变压器产品生产碳足迹数据，通过应用碳足迹模型对业务环节的碳排放开展计算，获得供给电网企业 110 kv 变压器产品生产碳足迹基本情况，进而验证碳足迹测算模型与方法的适用性。

经测算，2021 年供给电网企业 110 kv 变压器单台全年总碳排放量为 184.42 吨。其中排放环节涉及产品原材料、生产过程、物流等业务环节，原材料业务环节碳排放量为 153.43 吨，占比总量的 83.20%，生产过程业务环节碳排放量为 30.18 吨，占总量的 16.36%，物流业务环节碳排放量为 0.81 吨，占总量的 0.44%。具体测算结果如表 7 所示。

Table 7. Carbon footprint of 110 kv transformer products

表 7. 110 kv 变压器产品生产碳足迹碳排放

| 序号 | 业务环节 | 二级业务 | 碳排放源 | 总碳排放值(每台) |
|-----------------|-------------|---------|----------|---------------|
| 1 | 原材料 | 硅钢片 | 硅钢片生产、运输 | 108.69 |
| 2 | | 电磁线(铜线) | 电磁线生产、运输 | 8.07 |
| 3 | | 绝缘件(纸板) | 绝缘件生产、运输 | 1.75 |
| 4 | | 变压器油 | 变压器油生产 | 34.93 |
| 5 | 生产过程 | 油箱 | 电能 | 3.90 |
| 6 | | 铁芯制作 | 电能 | 8.78 |
| 7 | | 线圈制作 | 电能 | 3.63 |
| 8 | | 引线装配 | 电能 | 0.30 |
| 9 | | 器身装配 | 电能 | 0.06 |
| 10 | | 气相干燥 | 电能、煤油 | 3.02 |
| 11 | | 器身压服 | 电能 | 0.58 |
| 12 | | 总装配 | 电能 | 2.91 |
| 13 | | 真空注油、静放 | 电能 | 3.49 |
| 14 | | 出厂试验 | 电能 | 0.00 |
| 15 | | 入库 | 电能 | 2.91 |
| 16 | | 生产配套 | 电能 | 0.00 |
| 17 | | 生产公共能耗 | 用电、用水 | 0.60 |
| 18 | 物流环节 | 成品运输 | 成品公路配送过程 | 0.81 |
| 总碳排放值(吨) | | | | 184.42 |

5. 结束语

本文研究构建了一套电力设备制造商碳足迹评价方法，帮助电网企业掌握变压器产品碳足迹，从而识别上游制造环节减碳潜力，引领上游制造企业绿色管理与技术升级，带动产业链绿色低碳转型，助力产业链迈向碳中和。

参考文献

- [1] 刘韵, 师华定, 曾贤刚. 电力企业碳足迹的生命周期核算技术体系研究[J]. 中国人口资源与环境, 2011(12): 321-324.
- [2] 李楠. 产品碳足迹标准对比及其供应链上的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [3] 王玓. 基于碳足迹分析的变压器低碳优化设计[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- [4] 柳君波, 徐向阳, 李思雯. 中国电力行业的全周期碳足迹[J]. 中国人口资源与环境, 2022, 32(1): 31-41.
- [5] 孟美文. 碳足迹分析在电力企业节能减排中的应用[D]: [硕士学位论文]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2011.
- [6] 秦新生. 国外物流企业供应链碳足迹管理创新与启示[J]. 物流科技, 2015, 38(2): 15-18.