

以变压器为例的电网主设备全生命周期成本分析方法研究

郭小东¹, 黄锦¹, 肖锋²

¹国网安徽省电力有限公司黄山供电公司, 安徽 黄山

²上海久隆企业管理咨询有限公司, 上海

收稿日期: 2023年6月25日; 录用日期: 2023年7月16日; 发布日期: 2023年7月27日

摘要

传统电网建设的成本管理方式, 以控制采购成本为主。在电网长期运行环境下, 追求安全、效能和成本三者的平衡关系, 控制整体成本符合目标则更为重要。本文基于全生命周期管理理论, 从电网主设备的成本归集和成本分析两个层面进行研究, 以10 kV变压器作为典型案例, 分析得出结论: 购置费用和故障率是案例变压器全生命周期最主要的两项因素。

关键词

电网主设备, 全生命周期, 成本归集, 成本分析

Research on LCC Analysis Method for Power Grid Primary Equipment with Example of Transformer

Xiaodong Guo¹, Jin Huang¹, Feng Xiao²

¹Anhui Power Huangshan Power Supply Co., Ltd., Huangshan Anhui

²Shanghai Jiulong Enterprise Management Consulting Co., Ltd., Shanghai

Received: Jun. 25th, 2023; accepted: Jul. 16th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

Abstract

The cost management approach in traditional power grid construction primarily focuses on controlling procurement costs. However, in the long-term operational context of the power grid,

achieving a balanced relationship between safety, efficiency, and cost becomes even more important. This study is based on the theory of lifecycle management and investigates the cost assignment and cost analysis of the power grid primary equipment. Taking a 10 kV transformer as a typical case, the analysis concludes that acquisition cost and failure rate are the two most significant factors throughout the life cycle of the transformer.

Keywords

Power Grid Primary Equipment, Life Cycle, Cost Assignment, Cost Analysis

Copyright © 2023 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

随着国内电网的高速发展，传统的资产管理方式遭遇诸多瓶颈，主设备使用周期短、运行效率低、技改投入大、维护成本高等问题逐渐显露。平衡安全、效能和成本三者的关系，成为电网企业资产精益化管理成功转型的前提条件[1]。资产全生命周期管理(Life Cycle Asset Management, 简称“LCAM”)作为全周期成本管理(Life Cycle Cost, 简称“LCC”管理)的衍生概念，是从系统整体目标出发，以资产作为基本分析对象，全面评估从设计开始直至退役的全过程，在满足安全、效益、效能三者平衡的前提下，追求资产全生命周期成本最优的一种理论方法[2]。资产全生命周期管理(LCAM)的核心理念，在于推动管理目标从注重设备效率向注重资产效率的转变，管理方法从技术决策向技术经济决策的转变，管理方式从职能管理向流程管理的转变，实现资产的实物流、信息流、价值流合一的高度集约化管理模式。

资产全生命周期管理(LCAM)是全周期成本管理(LCC)的发展和丰富，包括安全管理(Safety Management, 简称“SM”)、效能管理(Efficiency Management, 简称“EM”)、资产管理(Asset Management, 简称“AM”)和全周期成本管理(LCC)。电网主设备全生命周期成本管理，分为成本归集和灵敏度分析两个方面[3][4]，成本归集围绕电网建设的投资采购、运行维护、故障检修、退役处置等供应链全过程的成本规制问题展开，重点是电网运行综合成本对于单体设备的合理分摊。灵敏度分析则基于长期运行数据，推导各类 LCC 因子的影响力。本文以变压器作为典型电网主设备，研究 LCC 成本归集和分析方法的具体应用[5]。

2. 理论方法

2.1. 电力设备 LCC 成本归集

2.1.1. LCC 阶段划分

电网主设备 LCC 归集，从规划、设计、建造、购置、运行、维护、更新、改造，直至退役报废的全过程，大体划分为五个阶段性部分[6]，全生命周期成本公式可简化表示为 $LCC = CI + CO + CM + CF + CD$ ，具体如表 1 所示。

1) 投入期成本归集

投入期成本是设备在项目投资建设过程中发生的成本，包括设备采购成本、生产制造费用(抽检费用、监造费用)、运输包装费用(运输费用、包装费用)及安装调试费用(安装费用、调试费用)。所有的成本均是

该单体设备直接产生的成本，不能含因无法明确成本来源而进行分摊的成本。生产、运输及其它成本的分摊规则，基于单体设备采购成本占项目设备采购成本的比例，将归集后的前期费用、建设及其它费用按比例拆分，按时间序列形成单体设备投入期成本。

Table 1. LCC cost apportionment model of power grid equipment
表 1. 电力设备 LCC 成本分解模型

阶段	成本分解
投入期成本 CI (cost of investment)	招标采购阶段主要涉及：采购成本 生产制造阶段主要涉及：抽检费用、监造费用 运输包装阶段主要涉及：运输费用、包装费用 安装调试阶段主要涉及：安装费用、调试费用
运行成本 CO (cost of operation)	巡视检查和日常维护作业中产生的材料成本、委外服务成本、能耗成本
修理成本 CM (cost of maintenance)	一般修理和大修时产生的材料成本和委外服务成本
故障成本 CF (cost of fault)	因设备出现故障进行抢修所产生的材料成本和委外服务成本
报废期成本 CD (cost of disposal)	提前报废/延长使用年限、处置收益、处置时发生的拆卸、运输等的处置成本和报废时资产的净值

2) 运维期成本分析

运维期成本是设备在运行阶段发生的成本，包括设备运行成本 CO (巡视检查成本和日常维护成本)、修理成本 CM (一般修理成本、大修成本)和故障成本 CF (抢修成本)，涉及设备的日常运维、日常检修、抢修、大修等业务过程中发生的材料成本(自主材料成本和外包材料成本)、人工成本、工器具损耗和委外服务成本。要求归集的结果能直接反应每次运维作业直接给该单体设备带来的成本，不包含因无法明确费用来源而分摊的费用。

运维期成本考虑该单体设备在巡视检查和日常维护作业过程中发生的人员、工器具成本。检修期成本考虑在对该设备进行一般修理和大修时产生的人工成本、工器具成本、材料成本和委外服务成本，选取归集结果中的一般修理成本和大修成本两项成本因素。要求所有的成本为明确直接用于该单体设备检修时的成本，不包含因无法明确费用来源来进行分摊的费用。故障期成本考虑因该单体设备出现故障进行抢修所产生的人工成本、工器具成本、材料成本和委外服务成本，选取 LCC 归集结果中的抢修成本。要求所有的成本为明确直接用于该单体设备故障抢修时的成本，不包含因无法明确费用来源来进行分摊的费用。

3) 报废期成本分析

报废期成本考虑该设备在进行报废时产生的成本，主要包括处置收益、处置时发生的拆卸、运输等的处置成本和报废时资产的净值，选取 LCC 归集结果中的处置成本、资产净值和处置收入三项成本因素。处置收益明确为拍卖该单体设备对应的废旧物资所形成的收益，资产净值明确为该单体设备的资产净值，处置成本明确为对该废旧物资报废处置时产生的成本，不含因成本来源不明分摊的成本。

2.1.2. LCC 成本分析

LCC 分析的重点在于准确评估 LCC 因素的影响力，常见的电网设备 LCC 因素包括采购单价、数量、使用周期、运行可靠性、维护成本、综合能耗以及报废处置费用等，各因素对 LCC 的影响存在相互制约

的平衡关系,若某一个因素的变化引起 LCC 强烈变化,则该因素具有较高的灵敏度,通常采用量化分析来计算灵敏度参数[7]。

1) LCC 估算模型

常用的 LCC 估算方法包括参数法、类比法和工程法,估算模型需要建立分解结构等式,基于采集到的成本数据,应用线性回归分析法,确定估算关系等式的相关系数。LCC 估算等式可以拆解为简单的表达式: $C = L(f_1, f_2, \dots, f_m) = \sum_{i=1}^m r_i f_i$, 其中, f_1, f_2, \dots, f_m 为影响费用各因素的数值,包括数量、单价、使用年限、平均故障间隔时间、平均修复时间等,所有数值必须先进行无量纲化处理; r_1, r_2, \dots, r_m 为经线性或非线性回归分析后确定的相关系数,通常是一个常数,若各因素之间存在相互影响,则可能是 f_1, f_2, \dots, f_m 的函数。

2) 灵敏度函数

费用估算模型确定后,基于历史数据直接将 LCC 对 f_i 求偏导数,偏导数数值越大,则 LCC 对 f_i 的灵敏度性也越大。通常情况下, LCC 参数 f_i 的灵敏度偏导数,即为线性相关系数:

$$\frac{\partial C}{\partial f_i} = \frac{\partial}{\partial f_i} L(f_1, f_2, \dots, f_m) = r_i$$

如果 $r_i > 0$ 则说明 f_i 是正相关因子,增加 f_i 会引起 LCC 的增加,且 r_i 的值越大,灵敏度越高;如果 $r_i < 0$, 则说明 f_i 是负相关因子,如果 $r_i \approx 0$, 则说明 f_i 是可以忽略的 LCC 因素。

3) 灵敏度评估

灵敏度函数仅反应了 LCC 对某一参数变化的剧烈程度,但并不说明 LCC 变化的绝对幅度,灵敏度函数应用过程中,若灵敏度函数较大,而参数本身的绝对数值较小,即参数与灵敏度函数的乘积占到 LCC 的比重不高,则可以在 LCC 成本分析中近似忽略。为了准确衡量参数的灵敏度,可以计算参数 f_i 对 LCC 影响的最小值 $SL_i \min$ 和最大值 $SL_i \max$ 。指标 $SL_i \min + SL_i \max$ 反映了参数 f_i 所占 LCC 份额的大小,需要保证数据取值较高的精度,指标 $SL_i \max - SL_i \min$ 反映了参数 f_i 的实际敏感性,数值越大越敏感[8]。

3. 以变压器为例的 LCC 方法应用

3.3.1. LCC 成本归集和灵敏度函数

此处以 10 kV 油浸式变压器为例, LCC 成本分析的重点在于变压器工作可靠性以及设备故障引发的电网损失,针对 10 kV 油浸式变压器和预装式变电站,需要厂商提供的数据有:设备容量(kVA)、设备报价、空载损耗(W)、负载损耗(W)、变压器重量(吨)、故障率(次/百台年)、声级水平(dB)、设备定期检修维护内容、设备检修维护周期。电网内部自行核算的参数如表 2 所示。

Table 2. LCC cost parameter of instance transformer

表 2. 样例变压器 LCC 成本参数

参数	赋值规则
安装调试费用	设备购置费基准价 × 15%, 设备购置费基准价为各厂家的均价。
运输费用	设备购置费基准价 × 3.5%
年运行小时数	8760 h
年平均负荷率	17%
成本电价	0.571 元/kWh
电价年递增率	3%

Continued

环保费用	单次环保费用取值为拆除超标变压器的费用、安装合格变压器费用以及两次运输设备的费用之和，并根据抽检试验的情况，对曾抽检不合格的厂家，LCC 计算时，按噪音试验超过标准每 1 db 对应超标概率为 0.5%。考虑抽检时噪音试验是距离设备 0.3 m，而标准是距离 1 m，故根据实际运行经验应在实测值上减少 2 db，这样仅一家厂家噪音抽检试验不合格。该厂家的环保费用发生在设备投运时第一年，取值为： $2\% \times (\text{拆除噪音超标变压器的费用} + \text{安装噪音合格变压器费用} + 2 \times \text{运输一台设备的费用})$ 。
巡检人员年工资	10.89 万元/年
巡检时间间隔和花费时间	油变取 12 人次/年，考虑巡检其他设备，每次 1 h；箱变取 6 人次/年，考虑巡检其他设备，每次 1 h
工资年增长率	5%
单次周期性维护费用	取设备购置费基准价的 5%
发生故障平均停电时间	10 kV 油浸式变压器发生故障平均停电时间 4 h；10 kV 预装式变电站发生故障平均停电时间 12 h。
材料平均回收价	卷铁心变压器：1.7 万/吨；(按变压器总重量算) 非晶合金变压器：1.7 万/吨；(按变压器总重量算) 预装式变电站：1.8 万/吨；(按变压器总重量算)
拆迁费用	拆迁费用 = 拆迁系数 * 安装费，拆迁系数取 0.468
安装费取	设备购置费基准价 \times 10%

敏感性函数

$$LCC = (\text{购置费} + \text{安装费} + \text{运输费})$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{a=1}^n (\text{能耗费} + \text{日常巡视费用} + \text{周期性维护费用}) + \text{故障损失费} + \text{拆除系数} * \text{安装费} \\
 & = \text{购置费} * (100\% + 15\% + 3.5\%) \\
 & + \sum_{a=1}^n (\text{空载损耗值} + \text{负载损耗值} * \text{负荷率}^2) * \text{年运行小时数} * \text{成本电价} * (1 + \text{电价增长率})^a * (1 + i)^{-a} \\
 & + \sum_{a=1}^n \text{年工资费} / (8 * 365) * \text{次数} * \text{巡视小时数} * (1 + \text{工资增长率})^a * (1 + i)^{-a} \\
 & + \sum_{a=5,10}^{30} \text{购置费} * 5\% * (1 + i)^{-a} \\
 & = \sum \left\{ \text{故障率} * (\text{停电损失负荷} * \text{平均停电时间} * \text{电价} * (1 + \text{电价增长率})^a + A) \right\} * (1 + i)^{-a}
 \end{aligned}$$

3.3.2. LCC 成本分析应用

此处选取业内 6 家主流变压器厂商，同规格变压器作横向对比，以购置费 A、空载损耗值 W 空、负载损耗值 W 负、故障率 f 进行初步计算，各厂家具体数据如表 3 所示。

Table 3. LCC cost parameter of instance suppliers

表 3. 样例供应商 LCC 成本参数

参数	供应商 A	供应商 B	供应商 C	供应商 D	供应商 E	供应商 F
购置费 A	24.98	24.68	24.01	24.04	23.3	19.27
空载损耗值	676	698.3	646	663	678	618
负载损耗值	5258	5325	5210	5236	5308	5310
故障率	0.3276	1.199	0.0234	1.0904	1.199	0.234

① 购置费 A 灵敏度:

$$\frac{\partial C}{\partial A} = 1 + 15\% + 3.5\% + 0.468 * 10\% + \sum 5\% * (1+i)^{-a} + \sum \text{故障率} * (1+i)^{-a} = 48.74$$

② 故障率灵敏度计算:

$$\begin{aligned} \frac{\partial LCC}{\partial W_{\text{空}}} &= \sum_{a=1}^{30} \{ \text{容量} * \text{平均负荷率} * \text{平均停电时间} * \text{成本电价} * (1 + \text{电价增长率})^a \\ &\quad + \text{新设备购置费} + \text{安装调试费} + \text{运输费} + \text{拆迁费用} \} * (1+i)^{-a} \\ &= 4323849.66 \end{aligned}$$

③ 空载损耗值重要性分析:

$$\frac{\partial LCC}{\partial W_{\text{空}}} = \sum_{a=1}^{30} \text{年运行小时数} * \text{成本电价} * (1 + \text{电价增长率})^a * (1+i)^{-a} = 112.93$$

④ 负载损耗值重要性分析:

$$\frac{\partial LCC}{\partial W_{\text{负}}} = \sum_{a=1}^{30} \text{负载率}^2 * \text{年运行小时} * \text{成本电价} * (1 + \text{电价增长率}) * (1+i)^{-a} = 46.56$$

灵敏度参数汇总如表 4 所示:

Table 4. LCC sensitivity analysis parameter for instance

表 4. 样例 LCC 灵敏度分析参数

参数	购置费	空载损耗值	负载损耗值	故障率
灵敏度函数值	48.74173	112.9286978	46.56169491	4323849.66
max	249800	698.3	5325	1.19944
min	192700	618	5210	0.0234
$S_{\max} + S_{\min}$	21568217	148648.0449	490527.4558	5285474
$S_{\max} - S_{\min}$	2783153	9068.174431	5354.594914	5083118

购置费和故障率的 $S_{\max} + S_{\min}$ 与 $S_{\max} - S_{\min}$ 都比较大, 因此购置费和故障率是一个非常重要的参数。

4. 结论

LCC 成本分析技术的应用前景十分广阔, 在电网设备采购环节, 传统的招标方案过于侧重采购成本, 或者无法准确衡量后期因素的评标权重, 而 LCC 成本分析法则给出了新颖的解决方案。另一方面, LCC 成本分析法指明了设备的核心参数, 有助于厂商合理调整生产工艺, 设计出更加符合电网建设实际需求的优质设备。

参考文献

- [1] 熊宁, 王伟, 李泰伟. 考虑本质安全的电网规划方案全寿命周期价值比选方法[J]. 南昌大学学报(理科版), 2020, 44(1): 81-86.
- [2] 祝锦舟, 张焰, 梁文举, 等. 面向规划的电网全寿命周期安全效能成本评估方法[J]. 中国电机工程学, 2017, 37(23): 6768-6779. <http://dx.doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.161854>
- [3] 刘家伟. 设备全生命周期管理措施探讨[J]. 中国设备工程, 2021(24): 38-39. <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1671-0711.2021.24.024>
- [4] 周奇才, 沈鹤鸿, 刘星辰, 等. 大型机械设备全生命周期管理体系结构研究[J]. 中国工程机械学报, 2017, 15(4):

318-323.

- [5] 陈湘州. 成本观的转变——从生产成本到生命周期成本[J]. 经济研究导刊, 2010 (25): 99-100.
<http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1673-291X.2010.25.044>
- [6] 杨彬. 试论电力工程全生命周期经济管理[J]. 中国市场, 2022(6): 92-93.
<http://dx.doi.org/10.13939/j.cnki.zgsc.2022.06.092>
- [7] 王毅. 试论电力工程经济管理方法的问题及对策[J]. 知识经济, 2016(7): 74.
<http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1007-3825.2016.07.048>
- [8] 庆格夫. 电网主型设备全生命周期风险管理模型及信息系统研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.