

基于LCC理念下的变压器成本与质量评价联动分析应用

薛佳炜

国网上海市北供电公司，上海

收稿日期：2025年1月10日；录用日期：2025年1月26日；发布日期：2025年2月28日

摘 要

本文通过归集变压器在采购、运行维护及报废阶段的全寿命周期成本，评估各项成本与质量的关联性，筛选质量敏感成本用以构建质量联动评价模型，并结合质量敏感性分析，有效识别影响全寿命周期成本的关键质量因素，综合考虑投入、运维和报废期成本，旨在优化变压器的采购决策，体现模型在变压器采购与运维管理中的实际价值，促使其在电力行业的设备管理中发挥更加重要的作用，进而优化企业管理成本的同时，实现成本与质量的最优平衡，为设备的全生命周期管理提供科学依据。

关键词

全寿命周期，变压器成本，质量评价，联动分析

Linkage Analysis and Application of Transformer Cost and Quality Evaluation Based on LCC Concept

Jiawei Xue

State Grid Shanghai Shibei Power Supply Company, Shanghai

Received: Jan. 10th, 2025; accepted: Jan. 26th, 2025; published: Feb. 28th, 2025

Abstract

The paper collects the whole life cycle cost of transformers in the stages of procurement, operation and maintenance, and scrap, evaluates the correlation between various costs and quality, screens quality-sensitive costs to build a quality linkage evaluation model, and combines with quality sensitivity analysis, effectively identifies the key quality factors affecting the whole life cycle cost, and

文章引用：薛佳炜. 基于 LCC 理念下的变压器成本与质量评价联动分析应用[J]. 现代管理, 2025, 15(2): 199-205.

DOI: 10.12677/mm.2025.152057

comprehensively considers investment, operation and maintenance, and end-of-life costs. The purpose is to optimize the transformer purchasing decision, reflect the actual value of the model in the transformer purchasing and operation and maintenance management, and promote it to play a more important role in the equipment management of the power industry, so as to optimize the enterprise management cost, achieve the optimal balance between cost and quality, and provide a scientific basis for the whole life cycle management of the equipment.

Keywords

Whole Life Cycle, Transformer Cost, Quality Evaluation, Linkage Analysis

Copyright © 2025 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

在全球绿色转型背景下，供应链现代化和质量管理的重要性愈发凸显。习近平生态文明思想为中国绿色发展提供了方向指引，国家电网公司积极响应，制定绿色现代数智供应链发展方案，引入全寿命周期管理覆盖设备设计、制造、交付、维护和报废等环节[1]。通过实物“ID”技术实现数据无缝流转，保障设备质量和性价比，为“双碳”目标的实现奠定了基础[2]。

全寿命周期质量管理(LCC)作为一种全面质量控制方式，强调在产品生命周期内持续优化质量，以减少因质量问题引发的成本浪费。特别是在电力行业，这一方法从设备设计到报废全流程管理中发挥了重要作用，提升了供应链质量的全面性与经济性[3]。绿色供应链的快速发展凸显了环境保护与资源节约的重要性。通过从源头控制设备质量并优化供应链决策，国家电网正在推动电力行业实现绿色转型与双碳目标[4]。

LCC 管理对设备采购、制造、运行及报废各阶段进行全流程优化，有助于识别成本关键点并控制长期运维成本[5]。通过基于 LCC 的质量联动评价模型，企业能在采购与运维中平衡质量与成本，提升设备可靠性并降低运营风险，为电力行业绿色低碳供应链和全生命周期管理提供了重要参考[6]。

2. 相关理论研究概述

2.1. LCC 分析技术

全寿命周期成本(LCC)分析技术最早在美国军方应用，以优化长期使用的设备成本，包括设计、制造、运行、维护等各阶段的费用核算。其后，LCC 逐步扩展到公共事业、建筑业和民用产业，为项目和产品的全生命周期提供全面的成本评估支持[7] [8]。LCC 分析的引入帮助企业在早期识别高成本因素并优化资源配置，从而实现长期成本的节约。在我国，LCC 方法应用始于国防和航空航天领域，随着 LCC 理论和技术的发展，电力、交通等行业也逐步采用 LCC 管理模式，尤其是电力行业正通过 LCC 方法来降低设备全生命周期的总成本[9]。

2.2. LCC 采购评价

LCC 采购评价是指在设备采购过程中，不仅考虑初始采购成本，更注重其生命周期内的运行和维护成本[10]。最早在瑞典铁路系统引入的 LCC 采购评价方法逐渐应用于航空、建筑和电力行业，以期实现设备的经济性与持久性[11]。电力行业因设备生命周期长、运维成本高，更加依赖 LCC 采购评价体系，

特别是国家电网等企业通过 LCC 模型优化设备的采购决策，确保供应链内的设备在全生命周期内表现出较高的性价比和可靠性。随着 LCC 采购评价的应用，企业可以在采购阶段全面预测设备的成本构成，促进设备全生命周期的价值实现[12]。

2.3. 采购质量评价

采购质量评价关注设备在采购时的质量标准及其与设备寿命周期的关系。传统的采购质量评价侧重于供应商资质和产品合格性，现代采购质量评价则引入全面质量管理理念，通过综合评价体系，对设备的技术性能、服务质量和效用等方面进行多维度考量[13]。在电力行业，采购质量评价通过精细化的指标体系保障了设备质量的持续优化，从而有效降低了设备生命周期内的维护和故障成本。采购质量评价体系为设备管理的科学化和精细化奠定了基础[14]。

3. 联评评价研究框架

主设备全寿命周期成本与质量联动评价研究框架，以变压器为典型物资，首先根据 LCC 成本归集理论，建立变压器 LCC 的成本归集规则，再根据专家评价结果，分析逐项 LCC 成本与质量的关联性，筛选出质量高度相关的成本，最后将质量敏感的成本重新组合，建立基于 LCC 成本与质量联动的采购应用模型。如图 1 所示。

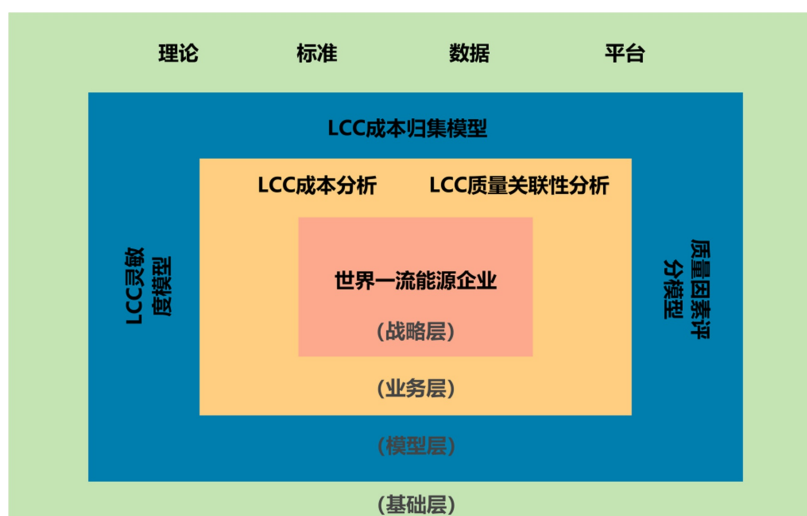


Figure 1. LCC and quality linkage model research framework

图 1. LCC 与质量联动模型研究框架

4. 变压器 LCC 成本分析研究

在设备全生命周期管理中，LCC 分析是一项至关重要的工具，尤其是在电力行业中，变压器作为重要的电网设备，其使用寿命通常较长，且维修和运行费用较高。通过 LCC 成本分析，可以全面评估变压器在整个生命周期内的成本构成，包括采购成本、运行成本、维护成本和废弃处置成本等。在这一分析中，LCC 为电力企业提供了对设备成本的深刻理解，从而为采购决策和设备管理策略提供有力支持。

4.1. LCC 成本归集

LCC 成本归集涉及从投入期到运行期，直至报废期的所有成本因素。具体而言，变压器的 LCC 成本分为五大类：投入期成本、运行成本、修理成本、故障成本和报废期成本。如图 2 所示。



Figure 2. Cost factors involved in LCC cost pooling

图 2. LCC 成本归集涉及的成本因素

投入期成本(C1): 包括变压器的采购成本、生产制造费用、运输费用、包装费用以及安装调试费用。在采购过程中, 投入期成本往往是企业关注的重点, 因为这一阶段的成本直接决定了设备的初期投资。

运行成本(C2): 主要是设备在运行过程中产生的能耗费用、巡视检查和日常维护作业的材料成本及服务费用等。这一阶段的成本是变压器全寿命周期中的核心部分, 因其直接影响到电力企业的运营效率和能源消耗。

修理成本(C3): 包括一般修理和大修所产生的人工费用、材料费用和委外服务费用。修理成本通常与设备的可靠性密切相关, 高质量的变压器能够降低修理频率, 从而减少修理成本。

故障成本(C4): 当变压器发生故障时, 所产生的抢修成本, 包括材料成本和外部服务费用。此类成本通常是突发性的, 且对设备的健康状态和管理水平提出较高要求。

报废期成本(C5): 涉及变压器在使用寿命结束后的拆卸、运输和处置等费用。

4.2. LCC 参数灵敏度分析

费用估算关系式一般具有如下结构, 其公式(1)如下所示:

$$LCC = f(P_1, P_2, \dots, P_m) = a_1 P_1 + a_2 P_2 + \dots + a_m P_m \quad (1)$$

其中, $P_1, P_2, \dots, P_m$ 为影响费用各因素的具体数值, 可以是数量、容量、单位价格、使用年限、平均故障间隔时间、平均修复时间等; $a_1, a_2, \dots, a_m$ 为经线性或非线性变换后的费用系数, 可以是一个常数, 但在更多情况下可能是 $P_1, P_2, \dots, P_m$ 的函数。

LCC 对任意参数 P_i 的敏感性函数为, 其公式(2)如下所示:

$$\frac{\partial LCC}{\partial P_i} = \frac{\partial}{\partial P_i} f(P_1, P_2, \dots, P_m) = a_i \quad (2)$$

建立 LCC 模型之后, 下一步将进行参数灵敏度分析, 以找出关键的灵敏参数, 为准备标书奠定基础。对于 LCC 分析来说, 分析的重点是显著影响 LCC 的因素。具体做法为在得到各参数的敏感性函数后, 再利用各参数的最小值 $P_1 \min, P_2 \min, \dots, P_m \min$ 和最大值 $P_1 \max, P_2 \max, \dots, P_m \max$, 可以计算出该参数对 LCC 影响的最小值和最大值, 其公式(3)和公式(4)如下所示:

$$|a_i P_{i \min}| = SL_{P_{i \min}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$|a_i P_{i \max}| = SL_{P_{i \max}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

两式计算的结果反映了各参数对 LCC 绝对值的影响规律。

以 10 kV 油变为例得出 10 kV 油变敏感性函数, 其公式(5)如下所示:

$$\begin{aligned} LCC &= CI + CO + CM + CF + CD \\ &= \sum_{a=1}^n \left\{ \text{故障率} * \text{停电损失负荷} * \text{平均停电时间} * \text{电价} * (1 + \text{电价增长率})^a + A \right\} * (1 + i)^{-a} \end{aligned} \quad (5)$$

5. LCC 成本与质量联动评价

针对 10 kV 油浸式变压器和预装式变电站, 需要厂家提供的相关内容 with 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。同时,说明,将对相关数据进行分析,与电力公司所掌握的数据进行比对,尤其对故障率数据根据抽检试验情况进行调整。

设定利率为 i , LCC 的计算年数为 n (本次评标 $n=20$), 年份变量为 a 年, a 在 0~20 间变化。按照 CI, CO, CM, CF 和 CD 五个功能模块计算 LCC 值。

5.1. 采购评标 LCC 计算

根据电力公司 10 kV 油浸式变压器和预装式变电站的数次抽检试验和电网实际运行情况,以最近一次的抽检试验情况,对各厂家的年平均故障率做计算。

设定 10 kV 变压器的基准年平均故障率为 x 次/百台年,以 0 次/百台年为起点计算,抗短路能力试验的步骤每一步不合格则增长 x 次/百台年,温升试验温升每超过标准 1 K 则增长 $3x$ 次/百台年;所有厂家的年平均故障率的平均值为上海市电力公司 10 kV 变压器的年平均故障率。油浸式变压器各厂家年平均故障率计算值参见表 1。

Table 1. Calculation of annual average failure rate of oil-immersed transformer

表 1. 油浸式变压器年平均故障率计算值表

项目 公司	试验产品型号	噪音	温升	短路电流承受能力试验 (抗短路能力)	年平均故障率计算值 (次/百台年)
供应商 A (315 kVA)	S11-MR-315/10	51 db (标准 45 db)	合格	垫块有位移, 没通过	0.04
供应商 B (400 kVA)	S11-MR-400/10	合格	合格	第 5 次试验后, 电抗超出标准, 没通过	0.4
供应商 C (400 kVA)	S11-MR-400/10	合格	合格	第 2 次试验后, 电抗超出标准, 没通过	0.52
供应商 D (400 kVA)	SBH11-M-400/10	47 db (标准 45 db)	高绕组 66.7 K 低绕组 69.3 K (标准 65 K)	第 1 次试验后, 电抗超出标准, 没通过	1.28

同油浸式变压器类似,预装式变电站的抽检项目包括了噪音温升等内容,短路电流承受能力试验则参考油浸变压器的试验情况。预装式变电站试验数据参见表 2。

Table 2. Test data of prefabricated substation

表 2. 预装式变电站试验数据

项目 公司	设备及型号	噪音	温升	短路电流承受能力试验 (抗短路能力)	年平均故障率计算值 (次/百台年)
供应商 A	预装式变电站 YBP10-12/0.4	合格	合格	垫块有位移, 没通过	0.0234
供应商 B	预装式变电站 YBP-12/0.4-500	合格	合格	N/A (参考短路试验最差的置信)	0.3276
供应商 C	预装式变电站 YBW13-315/10	合格	合格	第 1 次试验后, 电抗超出标准, 没通过	0.3276
供应商 D	预装式变电站 ZB256-500/10	合格	不合格 顶层油温升 $68.5 \leq 60$ 高压绕组温升 $67.7 \leq 65$	第 2 次试验后, 电抗超出标准, 没通过	1.0904
供应商 E	组合式变压器 ZFS11-H-500/10	合格	合格	第 5 次试验后, 电抗超出标准, 没通过	0.234

5.2. 损耗计算方案

10 kV 油浸式变压器和预装式变电站评标中采用的空载损耗值、负载损耗值以抽检试验结果为重要依据。抽检合格的产品，评标实际计算时按照各厂家的实际投标考核值计算。抽检不合格的数据按照标准值与超出标准部分一半的值进行计算。标准值参照《10 kV 油浸式电力变压器技术规范》《10 kV 预装式变电站选用技术规范》的相关规定。

特别是对于非晶合金变压器和预装式变电站，因非晶合金空载损耗受抗短路能力影响较大，目前质量合格的非晶合金产品在抗短路能力试验前后，不能保证空载损耗值的增幅在 10%以内，根据电网运行情况，目前对于质量合格的非晶合金产品的空载损耗值取厂家所报空载损耗值的 110%。预装式变电站空载、负载损耗值抽检结果与空载、负载损耗计算值情况如下表 3。

Table 3. Calculated value of no-load and load loss
表 3. 空载、负载损耗计算值

公司	项目 设备及型号	空载损耗 W	空载损耗计算值 W	负载损耗 W	负载损耗计算值 W
供应商 A	预装式变电站 YBP10-12/0.4	合格 466	投标 考核值	合格 5415 标准: 5956	投标 考核值
供应商 B	预装式变电站 YBP-12/0.4-500	合格 661.5	投标 考核值	5321 标准为: 5174	5173.5
供应商 C	预装式变电站 YBW13-315/10	合格 152	190×110%	合格 3706	3650
	500kVA 预装式变电站	N/A	投标 考核值 × 110%	N/A	5100
供应商 D	预装式变电站 ZB256-500/10	合格 ≤680	投标 考核值	5426-5100	5263
供应商 E	组合式变压器 ZFS11-H-500/10	合格 650	投标 考核值	5520-5220	5250

6. 总结

本文通过分析变压器 LCC 与质量联动评价模型的应用，探讨了该模型在变压器采购与运维管理中的实际价值。通过 LCC 成本分析，企业能够全面评估设备生命周期内的各类成本，包括采购、运行、维修及报废期成本。同时，结合质量敏感性分析，模型有效识别了影响 LCC 成本的关键质量因素。应用案例表明，LCC 与质量联动评价模型能够优化了企业的管理，减少了管理成本，同时保证了各方的质量。未来，随着进一步发展，该模型将在电力行业的设备管理中发挥更加重要的作用，还需要加大对 LCC 招标的重视水平。

参考文献

[1] 黎舟. 全寿命周期管理在电力企业固定资产管理中的有效应用研究[J]. 通讯世界, 2024, 31(9): 124-126.
[2] 张战营, 朱宜放. LCC 模式在雄安新区招标采购中的应用探讨[J]. 招标采购管理, 2024(8): 64-66.
[3] 田笑, 王瑞武. 全寿命周期造价管理在电力工程造价管理中的应用分析[J]. 电气技术与经济, 2023(10): 250-252.
[4] 聂大欢, 赵长森, 杨耀峰, 等. LCC 理念在煤矿设备全寿命周期精细化管理中的探索与应用[J]. 中国设备工程, 2024(S1): 307-309.
[5] 安超印, 吴阳阳. 基于全寿命周期的电网主设备成本分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40(4): 164-165.

-
- [6] 肖良涛. 基于全寿命周期成本的 S 公司设备采购改善研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.
 - [7] 葛晓辉, 刘东生. LCC 成本管理理念在产品研发设计阶段的应用[J]. 会计师, 2006(8): 54-55.
 - [8] 曹灿. 基于 LCC 成本输变电工程方案比选模型的探讨[J]. 低碳世界, 2014(10): 107-108.
 - [9] 喻国宝. 110 千伏线路节能导线 LCC 成本的敏感性分析[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2019, 19(4): 6-11.
 - [10] 周孔均, 李海俊, 侯兴哲. 全寿命周期成本(LCC)理论在电能表管理中的应用[J]. 电测与仪表, 2006, 43(10): 21-25.
 - [11] 张俊. 基于全寿命周期成本(LCC)的变电站建设的决策分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.
 - [12] 吕建国. 基于 LCC 理论的电力工程项目成本管理的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011.
 - [13] 闫伟君, 薛政宇. 基于 LCC 理论的建筑物维修成本控制[J]. 现代营销: 学苑版, 2010(10): 76-77.
 - [14] 余朝胜. 基于全寿命周期成本(LCC)理念的绝缘子选型[J]. 能源与环境, 2011(5): 11-13.