

基于多体系数据融合的主变压器 全寿命成本分析

熊 一¹, 廖晓红¹, 柯方超¹, 周秋鹏¹, 唐学军¹,
明 月¹, 李智威¹, 周任军²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430050; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:针对全寿命周期成本测算困难的问题,在分析主变压器各项成本的特性基础上,提出分层级计算方法。该方法基于生产管理系统(PMS)、企业资源管理(ERP)系统多体系数据融合得到基础数据,通过引入回归分析、盲数理论,对建立的主变压器全寿命周期成本数学模型进行分层级计算。充分考虑资金的时间价值,采用经济学中净现值法将各阶段成本划归基础年份成本进行分析,使得模型更贴近实际。并以某国内外2家厂商的220 kV、180 MV·A电力变压器为例,分析全寿命周期成本的具体计算方法。结果表明,生产管理系统下数据驱动的分层级计算全寿命周期成本方法的有效性。

关键词: PMS; ERP; 数据驱动; 回归分析; 盲数理论

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.001 中图分类号: TM-9 文章编号: 1673-9140(2020)06-0003-09

Life cycle cost analysis of main transformer based on the multi-system data fusion

XIONG Yi¹, LIAO Xiaohong¹, KE Fangchao¹, ZHOU Qiupeng¹, TANG Xuejun¹,
MING Yue¹, LI Zhiwei¹, ZHOU Renjun²

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In view of the difficulty in calculating the life cycle cost, a hierarchical calculation method is proposed based on the characteristics analysis of various costs for the main transformer. The proposed method obtains the basic data by the data fusion of PMS and ERP systems. Then, the regression analysis and blind number theory are introduced to calculate the mathematical model of life cycle cost for the main transformer. Considering the time value of funds, the net present value method in economics is utilized to classify the cost of each stage into the cost of the base year for analysis, which makes the model closer to the reality. Finally, 220 kV, 180 MV·A power transformer of two domestic and foreign manufacturers are taken as an example to analyze the specific calculation method of life cycle cost. The results show that the data-driven hierarchical calculation method is effective.

Key words: PMS; ERP; data driven; regression analysis; blind number theory

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(91746118); 湖南省自然科学基金(2019JJ40302); 国网湖北省电力有限公司科技项目(521538180011; 521538200006)

通信作者: 熊 一(1988-), 男, 博士, 主要从事电网管理研究; E-mail: 675786099@qq.com

全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)是将设备生命周期即从采购、运行、故障到退役的成本统筹考虑,是评价设备优劣的重要指标。全寿命周期成本具有三全特征^[1],分别为全过程、全费用和全系统。全过程是指贯穿设备的全寿命周期;全费用是指考虑寿命周期内的总费用;全系统是指在制度上保证全寿命周期成本管理的实施,统筹考虑寿命周期,寻求全局最优,规避了局部的思想。

随着国网精益化管理的不断深入,设备全寿命周期管理越来越受重视。文献[2]建立了详细的变压器 LCC 模型,更全面的分析了各项的成本模型;文献[3]提出了一种新的变电站设备维护的优化策略,可以有效降低变电站供电风险,提高设备维护效率,降低设备维护成本;文献[4]对有故障周期的变压器进行了分析,通过计算经济指标得到了变压器的最佳停运时间;文献[5]通过量化断路器的状态指数和重要度指数来确定不同断路器的检修顺序,但该方法缺少经济性指标的评估。

尽管目前针对现有设备全寿命周期的成本分析开展了很多卓有成效的研究,但也存在一些不足之处,从数据来源的角度看,存在全寿命周期成本数据来源于静态理想数据,未结合动态生产管理系统的不足;从计算方法来看,存在计算方法单一的不足。该文深入分析各阶段成本特点,融合生产管理系统,结合信息分类理论^[6],对不同信息针对性采用不同方法求解,提出基于多体系数据融合下数据驱动方式的全寿命周期成本分层级计算方法,从而更好地支撑资产的全寿命周期管理。

1 主变压器全寿命周期成本

变压器 LCC 包括设备购置、安装、运行、维护、改造、报废等费用^[7]。主要包括变压器的初始投资、运行、检修维护、故障和退役处置成本:

$$C_{LCC} = C_1 + C_0 + C_M + C_F + C_S \quad (1)$$

式中 C_1 、 C_0 、 C_M 、 C_F 、 C_S 分别为变压器的初始投资、运行、检修维护、故障、退役成本。

1.1 电力变压器全寿命周期各阶段成本特点分析

将信息分为白、灰、黑色信息,分别对应信息完

全已知、部分已知和完全未知 3 种情况^[8]。该文借助信息系统分类方法分析主变压器全寿命周期成本的各阶段成本特点,可知投资成本属于白信息;退役成本通常由投资成本按比例折算,属白信息;检修成本由于只有有限年份数据,故属于灰色信息;运行和故障成本受气候、环境、运行状况、国家政策、经济形势等诸多不确定因素的影响而导致无准确数据来源,属于黑色信息。该文采用大数据思维,借助当前电网公司正在大力发展的精益化生产管理系统 PMS (power production management system, PMS)、企业资源管理 ERP (enterprise resource planning, ERP) 系统融合得到相关数据^[9],这些数据属于已知信息。投资、退役成本属白色信息,取自于系统融合得到的数据;检修成本属灰色信息,采用回归分析,通过拟合优度 R 方和统计显著性 p 值检验回归模型;运行、故障成本属于黑色信息,采用盲数理论计算。

1.2 盲数理论在全寿命周期成本中的应用

盲数是处理不确定性信息的重要数学工具,设 \mathbf{B} 为实数集, \mathbf{R} 为不确定有理数集, $\mathbf{B}(I)$ 为区间有理灰数集^[10]。如果存在 $m_i \in \mathbf{B}(I)$, $\gamma_i \in [0, 1]$, $i = 1 \sim h$, $f(x)$ 为定义在 $\mathbf{B}(I)$ 上的灰函数且满足:

$$f(x) = \begin{cases} \gamma_i, & x = m_i, i = 1 \sim h \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

当 $i \neq j$ 时, $m_i \neq m_j$, $\sum_{i=1}^h \gamma_i \leq 1$, 则称 $f(x)$ 为 h 阶盲数, $\sum_{i=1}^h \gamma_i = \gamma$ 为盲数的总信任度, γ_i 为盲数在 m_i 的可信度^[11]。

设 x_i 、 x_{i+1} 均为实数,且 $x_i \leq x_{i+1}$, 将 $(x_i + x_{i+1})/2$ 的过程记为 $\theta(x_i, x_{i+1})$, 则盲数 A 、 B 的均值计算公式为

$$E(A) = \begin{cases} \mu, & x = \sum_{i=1}^m \mu_i \theta(x_i, x_{i+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$E(B) = \begin{cases} \delta, & y = \sum_{j=1}^n \delta_j \theta(y_j, y_{j+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

盲数的均值加法性质为

$$E(A + B) = E(A) + E(B) =$$

$$\begin{cases} \mu\delta, z = \sum_{i=1}^m \mu_i \theta(x_i, x_{i+1}) + \sum_{j=1}^n \delta_j \theta(y_j, y_{j+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

1.3 等年法

由于资金具有时间价值,故将来或过去和现在的等额资金其购买力是完全不同的^[12]。根据经济学现值法,将不同年份的资金划归至基准年份中,消除资金的时间效应。等额年金现值法范畴,首先将资金划归至基准年份中,然后将所有净现值转换成相当于在整个寿命期里面平均每年产生的等额现金流, $\frac{r(1+r)^s}{(1+r)^s - 1}$ 为等额年金系数,其中, r 代表贴现率, s 代表期望使用的寿命。

贴现率一般取银行利率,实际生产中多取为 5%~10%,贴现率决定着资金的现值^[9]。符合社会实际情况的贴现率有助于提高设备全寿命周期成本测算准确性。该文根据中国中央银行 2011—2020 年的 10 年贷款基准利率取平均水平,即 $r=8\%$ 。

2 多体系数据融合

1) 系统关联过程。

数据的处理关键在于数据的关联与融合, PMS 和 ERP 系统中都包含有设备的多种信息,但 PMS 侧重于设备基础信息, ERP 侧重设备财务信息,由于 2 个系统之间是相互独立的,导致处于 2 个系统中同一设备的相关信息无法直接归集到该设备。通过对数据的分析,以 PMS 和 ERP 系统中共有的设备编号为桥梁,将同一设备的位于 2 个系统中的相关信息进行联结,实现数据的关联融合。数据关联的过程如图 1 所示。

2) 修理费用归集解决方案。

由于财务数据的记录遵循着自身的规律,财务科目记账为大类,诸如“变电检修”、“通信检修”,无法具体到设备,而设备全寿命周期成本需计算设备级成本,故无法从财务数据的方面得到设备的修理费用。经研究,基于 PMS 修理任务单提取设备的

修理记录,结合国网权威文件《电网检修工程预算定额 第一册 电气工程(2015 年版)》,从而确定设备的修理费用,具体方案如图 2 所示。

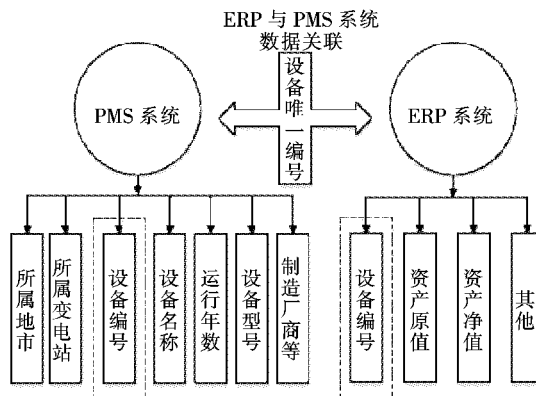


图 1 数据关联融合解决方案

Figure 1 Data association fusion solution

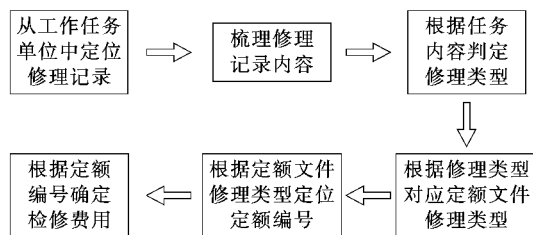


图 2 修理费用归集解决方案

Figure 2 Repair cost collection and settlement scheme

3 主变压器全寿命周期成本建模

3.1 静态成本

1) 初始投资成本。

初始投资成本是指电力变压器正式投入运行前发生的各项费用之和:

$$C_1 = C_{ps} + C_{is} + C_{ot} \quad (6)$$

式中 C_{ps} 、 C_{is} 、 C_{ot} 分别为设备购置、设备安装调试、其他费用。

2) 电力变压器退役成本。

电力变压器退役成本包含退役处理费和设备残值。退役处理费是指拆除设备所发生的人工、材料、机械等费用,根据《电网工程假设预算编制与计算标准使用指南》,停运处理费一般为设备安装调试费用的 32%。由于电力变压器中含有大量的铜和钢材,在停运之后又残余的回收价值,这部分价值称为设备的残值,一般达到购置费的 5%^[13]。

退役处理费:

$$C_D = C_{is} \cdot K_1 \quad (7)$$

式中 K_1 为退役处理系数,取值为 32%。

残值计算方法为

$$R_V = C_{ps} \cdot K_2 \quad (8)$$

式中 K_2 为残值系数,取值为 5%。

综合式(7)、(8),折现处理后可得退役成本的数学模型,即

$$C_S = \frac{C_D - R_V}{(1+r)^s} \quad (9)$$

3.2 动态成本

1) 损耗成本。

变压器的损耗主要是电能损耗,即空载和负载损耗^[14],损耗成本可通过设备基础参数计算得到:

$$\Delta P = P_k T_y + \alpha^2 P_0 \tau \quad (10)$$

式中 P_k 、 P_0 分别为变压器的空载、负载损耗; T_y 为变压器年运行小时数,取 8 760 h; α 为变压器的负载率,取 50%; τ 为年最大负荷损耗小时数,取 6 500 h。可得变压器年能耗费用为

$$C_E = V \cdot \Delta P \quad (11)$$

式中 V 为电能成本费,元/(kW·h)。

2) 运行维护成本。

变压器的运行维护成本主要包括日常维护费用、环境成本。在运行过程中,电力变压器会对周围的环境产生影响,产生温室气体和噪声污染,所以还得考虑其带来的环境成本。环境影响以一定的方式量化,环境成本反映在电力变压器的 LCC 模型中;日常维护费即寿命期内定期维护设备发生的费用,包含更换零部件、巡查等所发生的费用等^[15]。

年运行维护费的数学模型为

$$C_O = C_O(x) \quad (12)$$

式中 $C_O(x)$ 为专家估算的每年运行维护成本的盲数。

3) 故障停电成本。

故障停电成本是指在运行过程中设备发生故障,由此带来的电量损失、修复、停电影响成本^[16],其计算方法为

$$C_F = C_F(x) \quad (13)$$

式中 $C_F(x)$ 为专家估算的每年故障停电成本的盲数。

定义黑箱成本为运行与故障成本之和,即

$$C_B = C_O + C_F \quad (14)$$

4) 电力变压器检修成本。

电力变压器从正式运行到退役期间的总维护成本为 C_M ^[17]。检修费是指变压器故障引起的检修费用,由定期和临时检修费组成,检修成本表达式为

$$C_M = C_M(x) \quad (15)$$

式中 $C_M(x)$ 为通过回归分析得到的盲数。

由式(6)~(15),可得出电力变压器 LCC 模型的表达式为

$$C_{LCC} = C_1 + \frac{C_S}{(1+r)^s} + \sum_{i=1}^s C_E \cdot \frac{1}{(1+r)^i} + C_B(x) \cdot s + \sum_{i=1}^s C_M(x) \cdot \frac{1}{(1+r)^i} \quad (16)$$

LCC 等额年金^[18]表达式为

$$Y_{LCC} = C_{LCC} \cdot \frac{r(1+r)^s}{(1+r)^s - 1} \quad (17)$$

4 算例分析

该文针对 2 个不同厂家同规格电力变压器进行分析,以 220 kV(180 MV·A) 国产电力变压器和规格相同的某国外企业电力变压器为例,对 2 家相同规格的电力变压器寿命周期成本进行估算和分析。假设:①变压器期望使用的寿命 s 为 30 a,贴现率 r 为 8%;②残余价值按变压器购置成本的 5%来考虑;③退役处理费按变压器安装调试费的 32%来考虑。

4.1 静态成本

电力变压器静态成本包括初始投资、停运处置成本。

1) 由多体系数据融合,经大数据分析可得,M 厂商变压器投资成本 $C_{I1} = 1\ 180.69$ 万元,购置成本 $C_{ps1} = 896.48$ 万元。N 厂商变压器的投资成本 $C_{I2} = 1\ 038.01$ 万元,购置成本 $C_{ps2} = 696.61$ 万元。M、N 厂商 220 kV(180 MV·A) 的电力变压器投资成本如表 1 所示。

2) 电力变压器停运处置成本。

根据式(9),M、N 厂商电力变压器停运处置成本分别为

$$C_{S1} = (38.45 \times 32\% - 896.4 \times 5\%) \times \frac{1}{(1+8\%)^{30}} = -3.23 \text{ 万元}$$

$$C_{S2} = (39.51 \times 32\% - 696.61 \times 5\%) \times \frac{1}{(1+8\%)^{30}} = -2.21 \text{ 万元}$$

表 1 设备投资成本

Table 1 Equipment investment cost

变压器 厂商	主变 容量/ (MV·A)	设备购 置费用/ 万元	安装调 试费用/ 万元	其他 费用/ 万元	投资 成本/ 万元
M	180	896.48	38.45	245.76	1 180.69
N	180	696.61	39.51	232.48	968.60

4.2 动态成本

4.2.1 损耗成本

M、N 厂商主变压器的基础数据如表 2 所示,包括主变压器的规格、损耗、事故率、缺陷率。根据式(10)、(11)可得变压器损耗成本分别为

$$C_{E1_total} = \sum_{i=0}^{29} \frac{(76 \times 8\,760 + 0.6^2 \times 294 \times 6\,500) \times 0.85}{(1+0.08)^i} = 2\,811.1 \text{ 万元}$$

$$C_{E2_total} = \sum_{i=0}^{29} \frac{(89 \times 8\,760 + 0.6^2 \times 307 \times 6\,500) \times 0.85}{(1+0.08)^i} = 2\,928.8 \text{ 万元}$$

表 2 变压器损耗参数

Table 2 Transformer loss parameters

变 压 器 厂 商	规 格	空 载 损 耗/ kW	负 载 损 耗/ kW	事 故 率/ (次/ 年·台)	缺 陷 率/ (次/ 年·台)
M	220 kV、 180 MV·A	76	294	0.018 2	0.226 4
N	220 kV、 180 MV·A	89	307	0.027 6	0.429 8

4.2.2 故障成本

以电力变压器故障成本为例,3 位专家对 2 个厂商变压器的故障成本进行定性估算。

1) 专家甲有 40% 的把握 M 厂商该规格下电力变压器每年的故障成本在 25~30 万元区间,有 60% 的把握 N 厂商在 40~45 万元区间。

2) 专家乙有 75% 的把握 M 厂商该规格下电力变压器每年的故障成本在 15~25 万元区间;有 85% 的把握 N 厂商在 35~45 万元区间。

3) 专家丙有 55% 的把握 M 厂商该规格下电力变压器每年的故障成本在 35~40 万元区间;有 65% 的把握 N 厂商在 45~55 万元区间。

则对 M 厂商该规格电力变压器年故障成本的专家甲、乙、丙综合可信度分别为

$$\epsilon_1 = \frac{0.4}{0.4 + 0.75 + 0.55} = 0.235\,3$$

$$\epsilon_2 = \frac{0.4}{0.4 + 0.75 + 0.55} = 0.441\,2$$

$$\epsilon_3 = \frac{0.4}{0.4 + 0.75 + 0.55} = 0.323\,5$$

同理可得 N 厂商该规格下电力变压器每年的年故障成本专家评估综合可信度,两厂商该设备的盲数分别为

$$C_{F1}(x) = \begin{cases} 0.235\,3 & [25,30] \\ 0.411\,2 & [15,25] \\ 0.323\,5 & [35,40] \end{cases}$$

$$C_{F2}(x) = \begin{cases} 0.285\,7 & [40,45] \\ 0.404\,8 & [35,45] \\ 0.309\,5 & [45,55] \end{cases}$$

将 $C_{F1}(x)$ 、 $C_{F2}(x)$ 分别代入式(3)、(4),可得盲数均值为

$$E[C_{F1}(x)] = \begin{cases} 1, & x = 27.43 \\ 0, & x = \text{其他} \end{cases}$$

$$E[C_{F2}(x)] = \begin{cases} 1, & x = 43.81 \\ 0, & x = \text{其他} \end{cases}$$

4.2.3 运行成本

M、N 厂商变压器的年运行成本盲数分别为

$$C_{O1}(x) = \begin{cases} 0.483\,4 & [2.5,3.5] \\ 0.357\,2 & [3.5,4.5] \\ 0.159\,4 & [4.5,5.5] \end{cases}$$

$$C_{O2}(x) = \begin{cases} 0.298\,4 & [2,4] \\ 0.425\,7 & [4,6] \\ 0.275\,9 & [6,8] \end{cases}$$

盲数均值为

$$E[C_{O1}(x)] = \begin{cases} 1, & x = 3.68 \\ 0, & x = \text{其他} \end{cases}$$

$$E[C_{O2}(x)] = \begin{cases} 1, & x = 4.96 \\ 0, & x = \text{其他} \end{cases}$$

运行和损耗成本之和用 C_B 表示, 由于黑箱成本是专家根据当前资金价值估算, 所以盲黑箱成本属于现值范畴, C_B 盲数为

$$C_{B1}(x) = C_{F1}(x) + C_{O1}(x) =$$

$$\begin{cases} 0.1137 & [27.5, 33.5] \\ 0.0840 & [28.5, 34.5] \\ 0.0375 & [29.5, 35.5] \\ 0.2133 & [17.5, 28.5] \\ 0.1576 & [18.5, 29.5] \\ 0.0703 & [19.5, 30.5] \\ 0.1564 & [37.5, 43.5] \\ 0.1156 & [38.5, 44.5] \\ 0.0516 & [39.5, 45.5] \end{cases}$$

$$C_{B2}(x) = C_{F2}(x) + C_{O2}(x) =$$

$$\begin{cases} 0.0853 & [42, 49] \\ 0.1216 & [44, 51] \\ 0.0788 & [46, 53] \\ 0.1208 & [37, 49] \\ 0.1723 & [39, 51] \\ 0.1117 & [41, 53] \\ 0.0924 & [47, 59] \\ 0.1318 & [49, 61] \\ 0.0854 & [51, 63] \end{cases}$$

由于计算得到的盲数表达式中有区间重叠, 通过盲数去除重合区间和合并小权重区间, 得到:

$$C_{B1}(x) = \begin{cases} 0.0194 & [17.5, 18.5] \\ 0.6850 & [18.5, 35.5] \\ 0.2956 & [37.5, 45.5] \end{cases}$$

$$C_{B2}(x) = \begin{cases} 0.0201 & [37, 49] \\ 0.9657 & [39, 61] \\ 0.0142 & [61, 63] \end{cases}$$

盲数均值为

$$E(C_{B1}(x)) = E(C_{F1}(x)) + E(C_{O1}(x)) =$$

$$\begin{cases} 1, & x = 31.11 \\ 0, & x = \text{其他} \end{cases}$$

$$E(C_{B2}(x)) = E(C_{F2}(x)) + E(C_{O2}(x)) =$$

$$\begin{cases} 1, & x = 50.03 \\ 0, & x = \text{其他} \end{cases}$$

由 $C_{B1}(x)$ 、 $C_{B2}(x)$ 和 $E(C_{B1}(x))$ 、 $E(C_{B2}(x))$ 可知 M、N 厂商主变压器的黑箱成本的现值区间和对应的可信度分布, 其中, M、N 厂商的主变黑箱成本盲数均值分别为 31.11、50.03 万元, 不超过该成本的可信度为

$$P(x \leq 31.11) =$$

$$0.0194 + 0.685 \times \frac{31.11 - 18.5}{35.5 - 18.5} = 52.75\%$$

$$P(x \leq 50.03) =$$

$$0.0201 + 0.9657 \times \frac{50.03 - 39}{61 - 39} = 50.43\%$$

4.2.4 检修成本

经数据融合得到数据可信度较高的 2013—2019 年检修工单, 梳理设备检修记录, 进行检修成本回归分析。具体做法: 以同一厂商同一规格的设备在生命周期的同一检修年份的平均检修成本作出散点图, 然后对散点图进行拟合, 得到该类设备的全寿命周期检修成本图, 据此方法将 7 年的数据推广至设备全寿命周期。

以 M 厂商 220 kV、180 MV·A 电力变压器为例, 若 M 厂商只有 2 台 220 kV、180 MV·A 主变, 分别为 a1、a2。将各检修年份的检修成本先折算至基准年中, 消除资金时间价值, 得出设备该检修年龄下折算后检修成本, 如表 3 所示。

将同一检修年龄的检修成本取平均水平, 作为 M 厂商该规格下主变的检修成本, 即可得 M 厂商该规格主变的各检修年龄下的检修成本:

$$\begin{cases} w_1 = y_1, w_2 = y_2, w_3 = \frac{y_3 + z_3}{2}, \\ w_4 = \frac{y_4 + z_4}{2}, w_5 = \frac{y_5 + z_5}{2}, \\ w_6 = \frac{y_6 + z_6}{2}, w_7 = \frac{y_7 + z_7}{2}, \\ w_8 = y_8, w_9 = y_9, \\ y_i \geq 0, z_i \geq 0, w_i \geq 0, i \in [1, 9] \end{cases} \quad (18)$$

式中 y_i 为 a1 主变的各年检修成本; z_i 为 a2 主变的各检修年龄下的检修成本; w_i 为 A 厂商同规格下设备的检修成本, 若当年未发生检修, 则检修成本为 0。

通过式(18)计算方法,可得 7 年的检修信息拓展到该厂商设备 9 年的检修成本信息。实际厂商的设备数量远超过 2 台,所以能够将 7 年的检修工单的信息推广到一个厂商设备的全寿命周期。

基于修理费用归集结果数据作出设备全寿命周期散点图,进行回归分析,可得 M 厂商 220 kV 变压器的全寿命周期检修成本,如图 3 所示,可知设备的检修成本在全寿命周期内呈经典浴盆曲线的变化规律。

根据拟合结果得出 M 厂商的 220 kV、180 MV·A 变压器的检修费用拟合函数,如表 4 所示,可知拟合曲线 R 平方大于 0.85, p 值小于 0.05,拟合优度和统计显著性都很好。各年份的检修成本如表 5 所示,可得 M 厂商 220 kV、180 MV·A 电力变压器全寿命周期检修成本为 763.04 万元。根据同样的方法预测出 N 厂商的全寿命周期检修成本,将各段成本代入式(16),得到设备全寿命周期成本,如表 6 所示。

进一步计算全寿命周期各阶段成本及 LCC 等

表 3 设备检修成本拟合方法

Table 3 Fitting method of equipment maintenance cost

年份	检修年龄/a		检修成本(折算后)/万元	
	a1	a2	a1	a2
2013	1	3	y1	z3
2014	2	4	y2	z4
2015	3	5	y3	z5
2016	4	6	y4	z6
2017	5	7	y5	z7
2018	6	8	y6	z8
2019	7	9	y7	z9

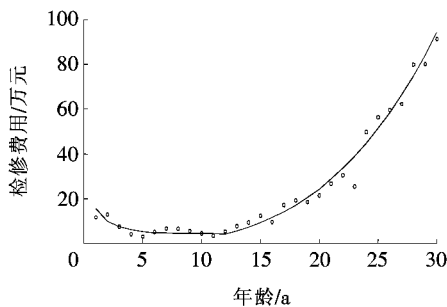


图 3 检修费用示意

Figure 3 Maintenance cost

额年金,将全寿命周期各阶段即投资、运行、检修、退役各阶段成本代入式(17),可得成本等额年金,如表 7 所示,可得 M 厂商 220 kV、180 MV·A 电力变压器的 LCC 等额年金为 504.82 万元,N 厂商同等规格下主变的 LCC 等额年金为 558.58 万元,可知 M 厂商设备的经济性优于 N 厂商,从全寿命周期来看,该规格主变宜采购 M 厂商设备。

表 4 拟合函数

Table 4 Fitting function

段数	年龄区间	拟合函数	拟合优度 R 平方	p 值
1	1,7	$y_1=15.731x_1^{-0.662}$;	0.905 0	0.003 5
2	7,12	$y_2=-0.058x_2+5.156$	0.849 5	0.043 2
3	12,30	$y_3=113.147 \times 10^{-6}x_3^{3.331}$	0.937 1	0.018 6

表 5 M 厂商 220 kV 主变各年的检修成本

Table 5 Annual maintenance cost of 220 kV main transformer of manufacturer M

检修年龄/a	折算后检修成本/万元	检修年龄/a	折算后检修成本/万元	检修年龄/a	折算后检修成本/万元
1	15.73	11	4.52	21	28.70
2	9.94	12	4.46	22	33.52
3	7.60	13	5.81	23	38.87
4	6.28	14	7.44	24	44.78
5	5.42	15	9.36	25	51.31
6	4.80	16	11.60	26	58.47
7	4.75	17	14.20	27	66.30
8	4.69	18	17.18	28	74.84
9	4.63	19	20.57	29	84.12
10	4.58	20	24.40	30	94.17
Total					763.04

表 6 两厂商 220 kV 主变全寿命周期成本

Table 6 Life cycle cost of 220 kV main transformer of two manufacturers 万元

变压器厂商	投资成本	检修成本	损耗成本	黑箱成本	退役成本	LCC
M	1 180.69	763.04	2 811.1	933.3	-3.23	5 684.90
N	968.60	894.18	2 928.8	1 500.9	-2.21	6 290.27

表 7 两厂商 220 kV 主变全寿命周期成本等额年金

Table 7 Life cycle cost equivalent annuity of 220 kV main transformer of two manufacturers 万元

变压器 厂商	等额年金					LCC
	投资 成本	检修 成本	损耗 成本	黑箱 成本	退役 成本	
M	104.85	67.76	249.63	82.88	-0.29	504.82
N	86.01	79.40	260.08	133.28	-0.20	558.58

5 结语

针对全寿命周期成本测算困难问题,该文采用分层计算的思路。对于投资、损耗、退役成本,借助电力信息大平台,采用数据驱动方式实现成本分析;对于检修成本,由于只有有限年限数据,采用回归分析的方法推广至全寿命周期;对于运行、故障成本,由于受许多不定因素影响,故在实际生产中没有准确的数据,采用盲数理论计算。通过研究,所得结论如下。

1)资产全寿命周期成本贯穿设备全寿命周期,是全面评估设备经济性的重要指标,对设备采购、运维有重要的指导意义。全寿命周期成本准确计算是难点所在,该文提出基于电力信息大平台多体系数据融合下,根据各阶段成本特点采用不同方法分层级计算,可有效提高成本的计算准确性。

2)LCC 等额年金较小的设备为经济性最优的设备,运营成本对 LCC 等额年金的影响最大,应着重加强对运营成本的控制。经研究表明,购买损耗小的设备、减少故障率、以状态检修取代定期计划检修以及适当提高设备的投资成本等措施均可有效可降低运营成本。黑箱成本小于盲数均值的概率分别为 52.75%和 50.43%,说明降低黑箱成本的空间较大。

3)在对设备进行全寿命周期成本分析时,大量的数据是 LCC 的重要支撑,宜推进精益化管理系统建设,为管理分析奠定坚实的基础。

参考文献:

[1] 张全,代贤忠,韩新阳,等.基于全生命周期投入产出效益的电网规划精准投资方法[J].中国电力,2018,51

(10):171-177.

ZHANG Quan, DAI Xianzhong, HAN Xinyang, et al. An accurate investment method of power grid based on full life cycle input-output benefit[J]. Electric Power, 2018,51(10): 171-177.

[2] 刘苏,姚建刚,韦亦龙,等.基于 Monte Carlo 的主变压器全寿命周期成本研究[J].电源技术,2017,41(2): 312-315.

LIU Su, YAO Jiangan, WEI Yilong, et al. Life cycle cost study of main transformer based on Monte Carlo [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(2): 312-315.

[3] 郭丽娟,陶松梅,张炜,等.兼顾供电可靠性和 LCC 的变电站主设备检修策略优化方法[J].电力系统自动化,2016,40(15):99-105.

GUO Lijuan, TAO Songmei, ZHANG Wei, et al. Maintenance strategy optimization for main equipment in substations considering both power supply reliability and life cycle cost[J]. Automation of Electric Systems, 2016,40(15): 99-105.

[4] 卞建鹏,杨苏,高世闯,等.基于全寿命周期成本的电力变压器检修决策[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(5):77-83.

BIAN Jianpeng, YANG Su, GAO Shichuang, et al. Maintenance decision for power transformer based on life cycle cost[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(5):77-83.

[5] 熊小伏,刘松,韦瑞峰,等.计及继电保护失效的断路器检修顺序决策方法[J].高压电器,2017,53(9):95-100.

XIONG Xiaofu, LIU Song, WEI Ruifeng, et al. Maintenance decision method of circuit breaker considering relay protection failure [J]. High Voltage Apparatus, 2017,53(9): 95-100.

[6] 党建,魏慧,贾嵘,等.基于定量修正层次分析的变压器性能评估方法研究[J].高压电器,2020,56(7):133-141+151.

DANG Jian, WEI Hui, JIA Rong, et al. Research on transformer performance evaluation based on quantitative correction analytic hierarchy process[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(7):133-141+151.

[7] 王文宾,白文广,石磊磊,等.电力变压器全寿命周期经济—物理综合寿命评估方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(4):91-98.

- WANG Wenbin, BAI Wenguang, SHI Leilei, et al. Evaluating method of power transformer full life cycle economic-physical comprehensive life[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 91-98.
- [8] 蔚德申, 王景芹, 王丽, 等. 基于灰色理论的低压断路器寿命预测模型的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 35-41.
- WEI Deshen, WANG Jingqin, WANG Li, et al. Research on life prediction model of low-voltage circuit breaker model based on grey theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 35-41.
- [9] 王建华, 张国钢, 宋政湘, 等. 物联网+大数据+智能电器——电力设备发展的未来[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 1-9+19.
- WANG Jianhua, ZHANG Guogang, SONG Zhengxiang, et al. Internet of things, big data, intelligent electrical apparatus—The future development of power equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 1-9+19.
- [10] Mi C, Liu J, Xiao X, et al. Interval multi-objectives optimization of electric wheel dump truck frame based on blind number theory[J]. Applied Ences, 2019, 9(20): 4214.
- [11] 张梦婕, 叶荣, 林章岁, 等. 考虑热载荷能力的风火打捆外送线路截面和火电容量联合优化[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 91-98.
- ZHANG Mengjie, YE Rong, LIN Zhangsui, et al. Joint optimization of wind-thermal bundling transmission line cross-section and thermal power capacity considering heat capacity[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 91-98.
- [12] 王涛, 刘雪飞, 郑重, 等. 基于潮流线性化的分布式发电选址定容新算法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 117-128.
- WANG Tao, LIU Xuefei, ZHENG Zhong, et al. Novel locating and sizing algorithm for distributed generation based on power flow linearization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 117-128.
- [13] 夏成军, 邱桂华, 黄冬燕, 等. 电力变压器全寿命周期成本模型及灵敏度分析[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 26-30.
- XIA Chengjun, QIU Guihua, HUANG Dongyan, et al. Life cycle cost model and sensitivity analysis of power transformer[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 26-30.
- [14] 邹明继, 吴琦, 马璐瑶, 等. 三相三柱式配电变压器负载特性对其空载损耗在线检测的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(Z2): 493-500.
- ZOU Mingji, WU Qi, MA Luyao, et al. Influence of load characteristics of three-phase and three limbs distribution transformer on on-line detection of no-load loss[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S2): 493-500.
- [15] 黄伟, 赵晓凤, 蒋利民, 等. 基于节能因素的变压器LCC评价方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 148-153.
- HUANG Wei, ZHAO Xiaofeng, JIANG Limin, et al. Study of LCC evaluation method for transformer based on the grid energy saving[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 148-153.
- [16] 姜源, 王丹, 孝小昂, 等. 全寿命周期成本理论在变电站非晶合金站用变压器选型中的应用[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 63-69.
- JIANG Yuan, WANG Dan, XIAO Xiaoang, et al. Application of life cycle cost theory in selection of amorphous alloy station transformer in substation[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 63-69.
- [17] 袁峻, 熊小伏, 韦瑞峰, 等. 一种优化可靠性与经济性的变压器检修决策方法[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 88-94.
- YUAN Jun, XIONG Xiaofu, WEI Ruifeng, et al. A maintenance decision method for optimizing reliability and economy of power transformer [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 88-94.
- [18] 梁刚, 李盛伟, 郭铁军, 等. 基于全寿命周期等年值成本的变压器更换辅助决策方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6): 130-134.
- LIANG Gang, LI Shengwei, GUO Tiejun, et al. Assistant decision-making method for transformer-replacement based on equivalent annual cost in life cycle[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(6): 130-134.