

DOI: 10.7667/PSPC180373

# 电力变压器全寿命周期经济-物理综合寿命评估方法

王文宾<sup>1</sup>, 白文广<sup>1</sup>, 石磊磊<sup>1</sup>, 朱燕舞<sup>1</sup>, 任雨<sup>2</sup>, 王宁<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司邢台供电分公司, 河北 邢台 054001;

2. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 针对电力变压器寿命定量评估问题, 提出了电力变压器全寿命周期经济-物理综合寿命评估方法。首先建立电力变压器全寿命周期成本模型, 分析了全寿命周期成本各组成部分与运行时间的关系, 以全寿命周期成本最低原则得到电力变压器经济寿命。建立了电力变压器物理寿命评价指标体系, 从电力变压器主绝缘老化程度、绝缘运行状态和部件缺陷风险三个方面进行综合评价, 运用层次分析法确定了各评价指标的权重, 得到电力变压器物理寿命。以电力变压器物理寿命作为基准, 综合考虑经济寿命, 建立全寿命周期经济-物理综合寿命模型。对某电力变压器进行实例分析, 评估了该变压器的经济-物理综合寿命, 验证了所提方法的合理性和实用性。

**关键词:** 全寿命周期成本; 电力变压器; 经济-物理综合寿命; 健康指数; 紧迫度

## Evaluating method of power transformers full life cycle economic-physical comprehensive life

WANG Wenbin<sup>1</sup>, BAI Wenguang<sup>1</sup>, SHI Leilei<sup>1</sup>, ZHU Yanwu<sup>1</sup>, REN Yu<sup>2</sup>, WANG Ning<sup>2</sup>

(1. Xingtai Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd, Xingtai 054001, China; 2. Institute of Economic and Technological Research, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** The method of power transformers full life cycle economic-physical comprehensive life evaluation is presented to solve the problem of quantitative life prediction. First, the life cycle cost model of power transformer is set up. The relationship between the components of the life cycle cost and the running time is analyzed. The economic life of power transformer is obtained by using the minimum full life cycle cost principle. The physical life evaluation system of power transformer is built from three aspects: the degree of main insulation aging, the state of insulation operation and the risk of component defects. The weight of each evaluation index is given by analytic hierarchy process, and then the physical life of power transformer is calculated. Considering the economic life, the economic-physical comprehensive life calculation method of power transformer is put forward based on the power transformer physical life. Finally, a power transformer is taken as an example to calculate the comprehensive economic-physical life, and the rationality and practicability of the method are verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777199).

**Key words:** life cycle cost; power transformer; economic-physical comprehensive life; health index; urgency

## 0 引言

电力变压器是变电站的重要设备, 合理评估电力变压器运行寿命对指导变电站设备改造、保障电网经济安全运行具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。电力变压器的寿命通常从物理寿命和经济寿命两个方面描述<sup>[2-3]</sup>。物理寿命是指设备从全新投入运行到因其性能老化而无法继续使用所经历的时间, 是由变压器构件的物

理性能决定。关于变压器经济寿命, 目前国内外尚未形成统一定义, 主要从变压器运行经济指标方面体现, 当运行成本出现拐点时即认为达到了经济寿命。电力变压器运行到一定年限后, 随着老化程度的加重, 其维护成本会显著提高, 经济指标开始下降。因而, 电力变压器经济寿命和物理寿命并不一致, 依据物理寿命进行电力变压器更换未必符合经济性, 需要兼顾考虑。因此, 科学合理的电力变压器寿命评估方法对指导电力系统规划改造具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777199)

文献[4-5]建立了电力变压器全寿命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)模型,提出以全寿命周期成本最小为原则进行电力变压器容量、型号和台数选择。文献[6]提出基于计量经济分析法的一次投资费用模型,以设备可靠性为效能指标,建立基于相对价值分析的费效优化模型。文献[7]建立了电力变压器区间全寿命周期成本的估算模型,提出了基于区间分析的全寿命周期成本的分析方法。文献[8]分析了影响电力变压器全寿命周期成本的主要因素。文献[9-10]对电力变压器经济寿命模型进行了研究,提出了电力变压器经济寿命预测方法。文献[11]提出了基于模糊理论的电力变压器经济寿命评估方法。在电力变压器物理寿命评估方面,文献[12-14]建立了电力变压器绝缘状态评估体系,结合红外热像仪与油中溶解气体分析方法对电力变压器绝缘状态进行综合评价,为电力变压器物理寿命评估奠定了基础。文献[15-16]提出基于健康水平诊断技术的电力变压器寿命评估模型。文献[17-18]通过计算在役设备的健康指数对变压器运行寿命进行评估。

电网建设改造投资规模受经济形势及电网企业运营状况等多方面因素影响,几乎不可能完全按经济寿命进行变压器改造。以上文献从不同角度分别对电力变压器经济寿命和物理寿命提出了评估方法,但由于两者的不一致性,电网规划人员如何运用好两类寿命指标仍面临困惑,只能凭借主观判断。尤其当有多台变压器临近改造,各变压器的经济寿命、物理寿命、投运时间以及全寿命成本增量梯度等多个参量处于不同状况时,如何决策各变压器的改造顺序和时间,是一个复杂的挑战。特别是随着电网规划、设备管理的信息化,模棱两可的主观评判手段无法适用,更需要建立一种综合反映经济寿命和物理寿命的可量化指标,以便清晰地描述变压器需要改造的紧迫程度。

本文提出一种电力变压器全寿命周期经济-物理综合寿命评估方法。首先建立电力变压器全寿命周期成本模型,以全寿命周期成本最低原则获得变压器经济寿命。建立了电力变压器物理寿命评价指标体系并运用层次分析法确定了评估指标权重。将经济寿命和经济成本增量表征为惩罚系数形式,作用到物理寿命中,形成电力变压器全寿命周期经济-物理综合寿命评估模型。应用某电力变压器实际数据评估了该变压器的经济-物理综合寿命,表明了综合寿命评估方法的合理性和实用性。

## 1 电力变压器经济寿命评估

### 1.1 电力变压器全寿命周期成本模型

按照全寿命周期理论,电力变压器的全寿命周期成本包括初次投资成本、运行维护成本、停电损失成本和处置成本四部分,可表示为

$$C = A_c + S_c + C_f + C_d \quad (1)$$

式中:  $C$  为电力变压器全寿命周期成本;  $A_c$  为初次投资成本;  $S_c$  为运行维护成本;  $C_f$  为停电损失成本;  $C_d$  为处置成本。电力变压器全寿命周期成本组成如图 1 所示。

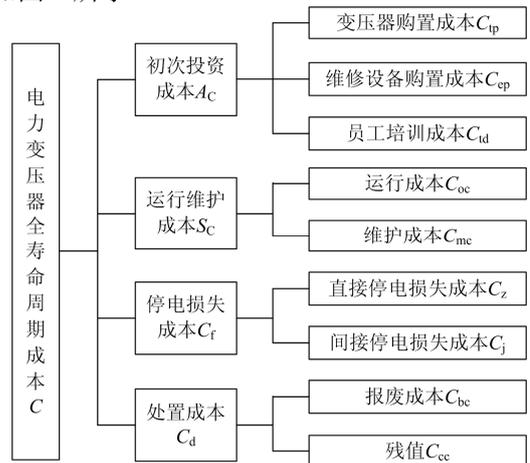


图 1 电力变压器全寿命周期成本组成

Fig. 1 Life cycle cost composition of power transformer

### 1.2 电力变压器的经济寿命

电力变压器全寿命周期成本各分量随时间变化,在全寿命周期成本模型的基础上,下面给出电力变压器经济寿命的评估方法。电力变压器全寿命周期成本  $C$  及其各组成部分随时间变化的曲线如图 2 所示。初次投资成本  $A_c$  与处置成本  $C_d$  之和折现值随着电力变压器运行时间的增加而逐年减少。电力变压器运行维护与停电损失成本前期较少,但随

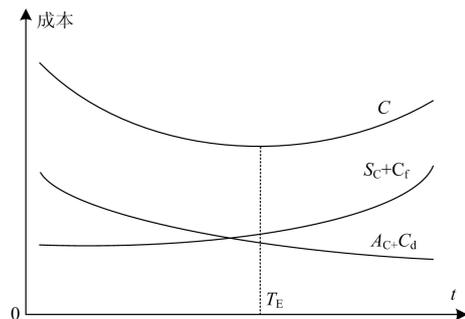


图 2 电力变压器全寿命周期成本曲线

Fig. 2 Life cycle cost curve of power transformer

着电力变压器的老化和部件缺陷风险的增加, 该成本随时间呈上升趋势, 是时间的非线性增函数。

由式(1)可知, 全寿命周期成本  $C$  是初次投资成本、运行维护成本和处置成本的叠加, 是一个凹函数, 在  $T_E$  时存在一个拐点使  $C$  达到最小, 此时电力变压器取得最优的经济效益,  $T_E$  即为变压器的经济寿命。如果在  $T_E$  时间点之后电力变压器继续使用, 随着运行时间增加,  $C$  会增大, 电力变压器使用的经济性会越来越差。

## 2 电力变压器物理寿命评估

### 2.1 电力变压器物理寿命评价指标体系

电力变压器物理寿命是指设备从投运开始到无法继续使用必须报废所经历的时间。随着电力变压器长期运行, 变压器本体的油纸绝缘材料受热会逐渐老化, 电力变压器的主绝缘老化程度和绝缘运行状态是影响电力变压器物理寿命的主要因素。电力变压器部件的缺陷风险会影响到电力变压器运行的可靠性, 因此这些因素也应包含在电力变压器物理寿命评价中。据上所述, 本文建立了电力变压器物理寿命评价指标体系, 将电力变压器健康水平指数  $\chi_{HI}$  作为评价目标, 评价体系中一级指标和二级指标如表 1 所示。

表 1 变压器物理寿命评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of transformer physical life

一级指标	二级指标
主绝缘老化 $\chi_{HI1}$	—
	糠醛 $\chi_{HI21}$
绝缘运行状态 $\chi_{HI2}$	绝缘纸聚合度 $\chi_{HI22}$
	油色谱 $\chi_{HI23}$
	油质试验 $\chi_{HI24}$
	例行试验 $\chi_{HI25}$
	诊断性试验 $\chi_{HI26}$
	本体 $\chi_{HI31}$
部件缺陷风险 $\chi_{HI3}$	冷却系统 $\chi_{HI32}$
	分接开关 $\chi_{HI33}$
	非电量保护装置 $\chi_{HI34}$
	套管 $\chi_{HI35}$

#### (1) 电力变压器主绝缘健康指数

采用英国 EA 公司的健康指数公式, 根据电力变压器初始投运年份主绝缘健康指数推算出当前年份的主绝缘健康指数, 如式(2)所示。

$$\chi_{HI1} = 1 - (1 - \chi_{HI0}) e^{B_0(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

式中:  $T_1$  和  $T_2$  分别为初始投运年份和当前年份;  $\chi_{HI0}$

和  $\chi_{HI1}$  分别为  $T_1$  和  $T_2$  时电力变压器主绝缘健康指数;  $B_0$  为变压器投运时初始老化系数。

#### (2) 电力变压器绝缘运行状态健康指数

根据文献[19]的要求, 电力变压器绝缘运行状态健康指数需考虑电力变压器的当前绝缘运行状态, 评估参量如表 1 所示。

糠醛体积分数  $C_f$  反映的健康指数为

$$\chi_{HI21} = 2.33 C_f^{0.28} \quad (3)$$

电力变压器油中糠醛含量  $C_f$  与绝缘纸聚合度  $DP$  符合如式(4)所示的半对数线性经验公式, 适用于使用矿物油和牛皮绝缘纸的电力变压器内绝缘材料的运行状态评价<sup>[20]</sup>。

$$DP = -k_1 \ln(C_f) + k_2 \quad (4)$$

式中:  $C_f$  为糠醛体积分数; 根据文献[20], 取  $k_1 = -115.82$ ,  $k_2 = 567.85$ 。

采用线性函数计算绝缘纸聚合度的健康水平指数  $\chi_{HI22}$ , 如式(5)所示。

$$\chi_{HI22} = \frac{DP_0 - DP}{-DP_0 - DP_f} \quad (5)$$

式中,  $DP_0$  和  $DP_f$  分别为初始值和终值, 本文中取  $DP_0 = 1000$ ,  $DP_f = 250$ 。

油色谱、油质试验、例行试验和诊断性试验等评价指标可得到各自的健康指数<sup>[21]</sup>。电力变压器绝缘运行状态健康指数  $\chi_{HI2}$  为

$$\chi_{HI2} = \sum_{i=1}^6 \chi_{HI2i} w_{2i} \quad (6)$$

式中:  $w_{2i}$  为权重系数,  $\sum_{i=1}^6 w_{2i} = 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

#### (3) 电力变压器部件缺陷风险健康指数

电力变压器部件缺陷风险是指由于发生故障而导致电力变压器部件出现缺陷的概率。对设备生产管理系统中电力变压器本体、冷却器系统、套管、分接开关和非电量保护装置的运行状态监视数据进行统计, 可得到各部件累计缺陷概率密度函数  $P_{3i}(t)$ 。

设电力变压器设备部件  $i$  已运行  $T$  年, 其可靠性得分

$$R_{3i} = 1 - P_{3i}(T) \quad (7)$$

根据设备现场运行状态, 对可靠性得分进行修正, 可得电力变压器部件  $i$  的缺陷风险健康指数  $\chi_{HI3i}$ 。

$$\chi_{HI3i} = R_{3i} R_1 R_2 \quad (8)$$

式中,  $R_1$  和  $R_2$  为修正系数,  $i = 1, 2, 3$ 。根据文献[19], 由于设备生产管理系统中该变压器部件缺陷风险为

“一般”，如表 2 所示，修正系数  $R_1$  取 0.9。设备生产管理系统中各部件均为正常运行，如表 3 所示， $R_2$  取 1。

电力变压器部件缺陷风险健康指数  $\chi_{HI3}$  为

$$\chi_{HI3} = \sum_{j=1}^5 \chi_{HI3j} w_{3j} \quad (9)$$

式中， $w_{3j}$  为权重系数， $\sum_{j=1}^5 w_{3j} = 1$ ， $j = 1, 2, \dots, 5$ 。

表 2 修正系数  $R_1$  的取值

Table 2 Values of correction coefficient  $R_1$

缺陷风险描述	一般	严重	危急
$R_1$	0.90	0.85	0.70

表 3 修正系数  $R_2$  的取值

Table 3 Values of correction coefficient  $R_2$

变压器部件状态描述	正常	注意	异常	严重
$R_2$	1.00	0.90	0.70	0.60

## 2.2 电力变压器物理寿命的计算

在当前工作状况下，电力变压器健康水平指数为

$$\chi_{HI} = \alpha \chi_{HI1} + \beta \chi_{HI2} + \gamma \chi_{HI3} \quad (10)$$

式中： $\chi_{HI}$  为电力变压器健康水平指数； $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  为权重。

根据电力变压器健康水平指数估计出电力变压器在当前工作状况下的物理寿命  $T_p$ ，其计算式为

$$T_p = T + \left[ \ln(1 - \chi_{HIr}) - \ln(1 - \chi_{HI}) \right] / B \quad (11)$$

$$B = \frac{B_0 L}{L - F_A T} \quad (12)$$

式中： $\chi_{HIr}$  为电力变压器退出运行时健康指数； $B$  为变压器退出运行时老化系数； $L$  为变压器正常运行寿命的统计值，按 18 000 h 计算； $F_A$  为等效加速老化因子， $F_A = 0.002 073$ ； $T$  为电力变压器运行时间。

## 2.3 电力变压器物理寿命评价指标体系权重的确定

电力变压器物理寿命评价指标体系各指标的权重通过层次分析法确定，具体步骤如下。

步骤 1：确定目标和评价因素集，建立如表 1 所示变压器物理寿命评价指标体系。

步骤 2：构造判断矩阵，建立判断矩阵  $U = (u_{ij})_{n \times n}$ ，其中  $u_{ij}$  表示评价指标  $u_i$  相对  $u_j$  的重要性数值，取值如表 4 所示。

步骤 3：对判断矩阵  $U$  进行一致性检验。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

式中： $CR$  为随机一致性比率； $CI$  为一般一致性指

标； $RI$  为平均随机一致性指标，取值如表 5 所示。

表 4 判断矩阵标度值含义

Table 4 Scale value meaning of judgment matrix

$u_{ij}$	含义
1	$u_i$ 与 $u_j$ 相比同等重要
3	$u_i$ 与 $u_j$ 相比稍微重要
5	$u_i$ 与 $u_j$ 相比明显重要
7	$u_i$ 与 $u_j$ 相比强烈重要
9	$u_i$ 与 $u_j$ 相比极端重要
2, 4, 6, 8	相邻判断值的中间值
倒数	$u_i$ 与 $u_j$ 反过来比较

表 5 平均随机一致性指标取值

Table 5 Average random consistency index values

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

判断矩阵的一般一致性指标由式(14)计算得到。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (14)$$

式中， $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值。

步骤 4：采用算术平均法计算权重，第  $i$  个指标权重  $w_i$  为

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left( \frac{u_{ij}}{\sum_{k=1}^n u_{kj}} \right) \quad (15)$$

步骤 5：进行一致性检验，按式(16)计算判断矩阵的随机一致性比率  $CR$ 。

$$CR = \frac{\sum_{i=1}^n w_i CI_i}{\sum_{i=1}^n w_i RI_i} \quad (16)$$

采用上述计算方法，并经过一致性检验，可得到变压器各特征参量的权重值。如表 6 所示。

## 3 电力变压器经济-物理综合寿命评估

### 3.1 综合寿命评估模型

电力变压器的物理寿命是一种刚性指标，只要到达物理寿命就不能继续使用；而经济寿命是一种弹性指标，变压器超过经济寿命依然可以使用，是否需要更换取决于可用资金等外部条件。变压器超过经济寿命的年限越多，全寿命周期成本的增量越大，则变压器需要更换的紧迫性就越强。本文将经济寿命以惩罚系数形式作用到物理寿命中，形成经济-物理综合寿命评估方法。

表 6 一级和二级指标权重  
Table 6 Weights of primary and secondary indicators

一级指标	一级权重	二级指标	二级权重
$\chi_{H1}$	0.661	$\chi_{H11}$	1
		$\chi_{H121}$	0.098
		$\chi_{H122}$	0.066
		$\chi_{H123}$	0.296
		$\chi_{H124}$	0.066
		$\chi_{H125}$	0.074
$\chi_{H2}$	0.208	$\chi_{H26}$	0.400
		$\chi_{H31}$	0.530
		$\chi_{H32}$	0.180
		$\chi_{H33}$	0.076
		$\chi_{H34}$	0.112
		$\chi_{H35}$	0.102
$\chi_{H3}$	0.131		

经济寿命惩罚系数定义为

$$F = \begin{cases} 1 & T \leq T_E \\ \frac{T_p - T}{T_p - T_E} \cdot \frac{C_p - C}{C_p - C_E} & T_E < T < T_p \end{cases} \quad (17)$$

式中： $F$  为惩罚系数； $C_p$  和  $C_E$  分别为物理寿命  $T_p$  和经济寿命  $T_E$  对应的全寿命周期成本； $C$  为当前年份  $T$  对应的全寿命周期成本。

定义电力变压器综合寿命为

$$T_s = FT_p \quad (18)$$

式中， $T_s$  为综合寿命。

由式(17)和式(18)可知，当  $T \leq T_E$  时，电力变压器未达到经济寿命，惩罚系数  $F=1$ ，综合寿命等于物理寿命；当运行年限超过经济寿命时，即  $T_E < T < T_p$  时，惩罚系数  $F < 1$ ，综合寿命受到惩罚而小于物理寿命；随着运行年限  $T$  的增加，惩罚系数  $F$  越来越小并趋于 0，从而对综合寿命的惩罚力度加大。

在此基础上，定义电力变压器改造的紧迫度为

$$U_r = 1 / (T_s - T) \quad (19)$$

式中， $U_r$  为紧迫度。

紧迫度越大，意味着该变压器需要改造的紧迫性越强。因而依据紧迫度指标可以对变压器的改造次序进行排队。

### 3.2 综合寿命评价流程

在完成了电力变压器经济寿命评估，确定了物理寿命评价指标权重，得到电力变压器物理寿命的基础上，下面给出电力变压器经济-物理综合寿命的评估方法。

步骤 1：按照 1.1 节中式(1)计算电力变压器每年的全寿命周期成本，按照全寿命周期成本最低原

则，取全寿命周期成本最小值所对应年份作为电力变压器经济寿命  $T_E$ 。

步骤 2：建立电力变压器物理寿命评价指标体系，计算各评价指标，按照 2.3 节中的方法确定一级指标和二级指标权重，计算出电力变压器健康指数。

步骤 3：按照式(11)计算电力变压器物理寿命  $T_p$ 。

步骤 4：按照 3.1 节中的方法建立电力变压器综合寿命评估模型，按照式(17)和式(18)分别计算电力变压器经济寿命惩罚系数和经济-物理综合寿命。

## 4 实例分析

某 220 kV 变电站现有上世纪 80 年代投运的 120 MVA 全容量电力变压器，已运行 30 年。下面按照 3.2 节给出的流程，对该电压变压器的经济-物理综合寿命进行评估。

### 4.1 电力变压器物理寿命的计算

(1) 电力变压器主绝缘健康指数

电力变压器主绝缘健康指数根据式(2)计算。

$\chi_{H10}$  为初始投运年份时电力变压器主绝缘健康指数，取 0.95； $B_0$  为老化系数，取 0.098 8。可得当前年份时的电力变压器主绝缘健康指数  $\chi_{H11} = 0.772 9$ 。

(2) 电力变压器绝缘运行状态健康指数

根据式(3)和式(5)分别计算出糠醛和绝缘纸聚合度含量的健康水平指数。油色谱、油质试验、例行试验和诊断性试验等 4 个评价指标的健康水平指数根据文献[21]中给出的方法计算。各二级指标的权重及健康水平指数计算结果如表 7 所示。电力变压器绝缘运行状态健康指数根据式(6)计算，其结果为  $\chi_{H12} = 0.716 8$ 。

表 7 电力变压器绝缘运行状态健康评价结果

Table 7 Health evaluation results of power transformer insulation operation state

指标名称	数值
油色谱	0.568 7
糠醛	0.724 0
油质试验	0.815 1
绝缘纸聚合度	0.791 2
例行试验	0.702 5
诊断性试验	0.681 4
电力变压器绝缘运行状态健康指数	0.721 6

(3) 电力变压器部件缺陷风险健康指数

电力变压器部件缺陷风险各二级指标的健康指数根据式(9)计算，电力变压器部件缺陷风险指标和权重如表 8 所示，最终计算结果为  $\chi_{H13} = 0.605 6$ 。

(4) 电力变压器健康水平指数和剩余寿命

计算电力变压器健康水平指数时, 一级指标权重如表 4 所示, 老化系数  $B$  取 0.099 1。根据式 (10) 可计算出电力变压器健康水平指数, 如表 9 所示。根据式(11), 计算出电力变压器物理寿命约为 38.624 1a。

表 8 电力变压器部件缺陷评价结果

Table 8 Power transformer component defect evaluation results

参量名称	数值
本体	0.625 8
冷却系统	0.562 1
分接开关	0.576 2
非电量保护装置	0.663 4
套管	0.535 8
电力变压器部件缺陷风险健康指数	0.605 6

表 9 电力变压器物理寿命评价指标及剩余寿命

Table 9 Physical life evaluation index and residual life of power transformer

参量名称	数值
电力变压器主绝缘健康指数	0.772 9
电力变压器绝缘运行状态健康指数	0.721 6
电力变压器部件缺陷风险健康指数	0.605 6
电力变压器健康水平指数	0.740 3
电力变压器物理寿命/a	38.624 1

4.2 电力变压器经济-物理综合寿命的确定

根据 1.1 节的方法计算电力变压器每年的全寿命周期成本, 如表 10 所示。

表 10 中所示的计算结果表明, 该电力变压器经济寿命为 27 a。当前运行时间  $T$  大于该电力变压器的经济寿命  $T_E$ , 根据式(17)可得惩罚系数  $F=0.84$ , 由式(18)可得电力变压器综合经济-物理综合寿命  $T_S=32.37$  a。电力变压器综合经济-物理综合寿命评价方法既顾及了电力变压器运行的经济性, 又考虑了电力变压器本身的物理寿命约束, 为变压器改造提供了决策依据。

5 结论

本文首先按照全寿命周期最小原则对电力变压器经济寿命进行了评估。建立了电力变压器物理寿命评价指标体系, 将电力变压器主绝缘老化程度、绝缘运行状态和部件缺陷风险三个方面指标通过层次分析结构有机结合, 对电力变压器物理寿命进行了评估。将电力变压器物理寿命作为刚性指标, 经

济寿命以惩罚系数形式作用到物理寿命中, 构造电力变压器全寿命周期成本经济-物理综合评估模型, 给出了评估流程。通过实例计算出某电力变压器的经济-物理综合寿命, 验证了该方法的合理性和实用性。

表 10 电力变压器每年的全寿命周期成本

Table 10 Annual total life cycle cost of the power transformer

运行年数	$A_c$ /万元	$S_c$ /万元	$C_f$ /万元	$C_d$ /万元	$LCC$ /万元
1	2000.00	9.70	13.45	137.05	2160.20
2	0.00	10.36	14.49	133.61	158.46
3	0.00	11.06	15.61	129.90	156.57
4	0.00	11.80	16.81	125.89	154.50
5	0.00	12.60	18.10	121.56	152.26
6	0.00	13.44	19.48	116.89	149.81
7	0.00	14.35	20.96	111.84	147.15
8	0.00	15.32	22.55	106.39	144.25
9	0.00	16.35	24.25	100.50	141.10
10	0.00	17.45	26.08	94.14	137.67
11	0.00	18.62	28.04	87.27	133.94
12	0.00	19.88	30.15	79.85	129.88
13	0.00	21.21	32.40	71.84	125.46
14	0.00	22.64	34.82	63.19	120.65
15	0.00	24.17	37.42	53.84	115.43
16	0.00	25.79	40.20	43.75	109.74
17	0.00	27.53	43.19	32.85	103.56
18	0.00	29.38	46.39	21.08	96.85
19	0.00	31.35	49.83	8.36	89.54
20	0.00	33.46	53.52	-5.37	81.61
21	0.00	35.71	57.47	-20.20	72.98
22	0.00	38.11	61.71	-36.22	63.61
23	0.00	40.67	66.26	-53.51	53.42
24	0.00	43.41	71.14	-72.19	42.35
25	0.00	46.33	76.37	-92.37	30.33
26	0.00	49.44	81.98	-114.16	17.26
27	0.00	52.76	88.00	-137.69	3.07
28	0.00	56.31	94.46	-163.11	12.34
29	0.00	60.09	101.39	-190.55	29.08
30	0.00	64.13	108.82	-220.20	47.25
31	0.00	68.44	116.78	-252.22	66.99
32	0.00	73.04	125.33	-286.79	88.42
33	0.00	77.95	134.50	-324.14	111.69
34	0.00	83.19	144.33	-364.47	136.95
35	0.00	88.78	154.88	-408.02	164.37
36	0.00	94.74	166.19	-455.07	194.13
37	0.00	101.11	178.33	-505.87	226.43
38	0.00	107.90	191.35	-560.74	261.49

## 参考文献

- [1] 史京楠, 韩红丽, 徐涛. 全寿命周期成本分析在变电工程规划设计中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 63-66.  
SHI Jingnan, HAN Hongli, XU Tao. Application of life cycle costs analysis in planning design of power transformation projects[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 63-66.
- [2] 于继来, 王成福, 张博, 等. 在役电力变压器经济寿命评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(3): 86-90.  
YU Jilai, WANG Chengfu, ZHANG Bo, et al. Economic life evaluation of power transformer in service[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(3): 86-90.
- [3] 程军照, 陈江波, 伍志荣, 等. 提高电力变压器使用寿命技术措施的分析[J]. 变压器, 2013, 50(11): 29-34.  
CHENG Junzhao, CHEN Jiangbo, WU Zhirong, et al. Analysis of technical measures to extend power transformer life time[J]. Transformer, 2013, 50(11): 29-34.
- [4] 罗晓初, 李乐, 魏志连, 等. 全寿命周期成本理论在配电电力变压器改造投资决策中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 207-211.  
LUO Xiaochu, LI Le, WEI Zhilian, et al. Applications of life cycle cost theory in decision-making of investment for distribution transformers renovation[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 207-211.
- [5] 宋宛净, 姚建刚, 汪觉恒, 等. 全寿命周期成本理论在主电力变压器选择中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 111-116.  
SONG Wanjing, YAO Jiangang, WANG Jueheng, et al. Application of life cycle cost theory in main transformer selection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(6): 111-116.
- [6] 吴文宣, 陈祥伟, 李天友, 等. 基于计量经济学综合分析法的电力设备全寿命周期成本管理[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(4): 53-57.  
WU Wenxuan, CHEN Xiangwei, LI Tianyou, et al. Power equipment life cycle cost management based on econometric analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(4): 53-57.
- [7] 江修波, 吴文宣, 陈祥伟. 区间分析法在电力变压器全寿命周期成本模型中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 50-53.  
JIANG Xiubo, WU Wenxuan, CHEN Xiangwei. Transformer life cycle cost model based on interval analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 50-53.
- [8] 崔新奇, 尹来宾, 范春菊, 等. 变电站改造中电力变压器全生命周期费用(LCC)模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 69-73.  
CUI Xinqi, YIN Laibin, FAN Chunju, et al. Study of LCC for power transformer in modification of transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 69-73.
- [9] 王慧芳, 赵婉芳, 杜振东, 等. 基于寿命数据的电力变压器经济寿命预测[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 810-816.  
WANG Huifang, ZHAO Wanfang, DU Zhendong, et al. Economic life prediction of power transformers based on the lifetime data[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 810-816.
- [10] 刘有为, 马麟, 吴立远, 等. 电力变压器经济寿命模型及应用实例[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 235-240.  
LIU Youwei, MA Lin, WU Liyuan, et al. Economic life model of power transformer and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 235-240.
- [11] 栗然, 韩彪, 卢云, 等. 基于随机模糊理论的变压器经济寿命评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 9-16.  
LI Ran, HAN Biao, LU Yun, et al. Transformer's economic life assessment based on random and fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 9-16.
- [12] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.  
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [13] 杨杰明, 董玉坤, 曲朝阳, 等. 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 102-109.  
YANG Jieming, DONG Yukun, QU Zhaoyang, et al. Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 102-109.

- [14] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.  
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.
- [15] 王有元, 陈璧君. 基于层次分析结构的电力变压器健康状态与综合寿命评估模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2845-2850.  
WANG Youyuan, CHEN Bijun. An integrated life estimation model of power transformer based on hierarchical architecture and health index[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2845-2850.
- [16] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 75-81.  
ZHANG Jingjing, XU Xiule, DING Ming, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 75-81.
- [17] 陈杏, 宋依群, 杨镜非. 基于状态联动的在役设备最佳运行寿命评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 67-73.  
CHEN Xing, SONG Yiqun, YANG Jingfei. Optimal service life evaluation model for in-service equipment based on state linkage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 67-73.
- [18] 李振柱, 谢志成, 熊卫红, 等. 考虑绝缘剩余寿命的变压器健康状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 137-142, 169.  
LI Zhenzhu, XIE Zhicheng, XIONG Weihong, et al. Transformer health condition assessment considering insulation remaining life[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 137-142, 169.
- [19] 国家电网公司. 油浸式电力变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GDW 10169—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.  
State Grid Corporation of China. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): Q/GDW 10169—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.
- [20] PRADHAN M K, RAMU T. On the estimation of elapsed life of oil-immersed power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1962-1969.
- [21] 张楠, 袁海文, 马钊, 等. 基于层次分析结构的配电变压器健康指数评价方法[J]. 供用电, 2016, 33(1): 14-20.  
ZHANG Nan, YUAN Haiwen, MA Zhao, et al. A health index evaluation method for distribution transformers based on hierarchical structure[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(1): 14-20.

---

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-23

作者简介:

王文宾(1973-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划与改造. E-mail: xtwangwb@126.com

(编辑 张爱琴)