

# 电力变压器全寿命周期成本模型参量的 敏感性分析

舒萍

(国网攀枝花供电公司 四川 攀枝花 617067)

**摘要:**影响电力变压器全寿命周期成本模型的不确定参数很多,这些参数的不确定性将直接影响电力变压器全寿命周期成本计算的准确性,因此从众多参量中找到对模型影响较大的参量不仅可以了解不确定因素对电力变压器全寿命周期成本评价指标的影响,从而提高决策的准确性;还可以知道对哪些较为敏感的因素需要重新进行分析研究,以提高预测的可靠性;斯皮尔曼相关系数分析法是分析输入不确定性对输出影响的主要方法,因此通过蒙特卡洛仿真模拟与斯皮尔曼相关系数分析方法对电力变压器全寿命周期成本模型参量分别进行定性与定量分析,最后得到了输入变量的重要度排序,为优化电力变压器全寿命周期成本模型参量的选取提供理论依据。

**关键词:**电力变压器;全寿命周期成本;敏感性分析;蒙特卡洛仿真;斯皮尔曼相关系数

**Abstract:** There are many uncertain parameters to influence life cycle cost(LCC) model of power transformer and will influence directly the accuracy of LCC, so not only the effect of uncertain parameters on LCC model should be known to improve the accuracy of decision, but also which parameters need to be repeatedly analyzed should be known to improve the reliability of calculation by finding the main parameter from these uncertain parameters. Spearman correlation coefficient is the important method that is used to analyze the effect of the uncertain inputs on the output. So the parameter of life cycle cost for power transformer is analyzed through the Spearman correlation coefficient and Monte Carlo simulation. Finally, the important order of input parameters is obtained, which provides the theory basic for the parameter selection of LCC for power transformer.

**Key words:** power transformer; life cycle cost; sensitivity analysis; Monte Carlo simulation; Spearman correlation coefficient  
中图分类号:F407.6 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2013)05-0059-05

## 0 引言

全寿命周期成本管理是从设备的长期经济效益出发,全面考虑设备或系统的规划、设计、制造、购置、安装、运行、维修、改造、更新、直至报废的全过程,使全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)最小的一种管理理念和方法。其核心内容是对设备或系统的全寿命周期成本进行分析,并进行决策<sup>[1-3]</sup>。

电力变压器在电力系统中占有重要位置,它对整个系统的总成本、效率及可靠性有极大的影响。随着电力资产规模的扩大,电力变压器在变电站中最优投资方案的选择应用全寿命周期成本理论就变得极为重要<sup>[4]</sup>。而电力变压器LCC模型中的参量如维修费、故障率及使用年限等数据多是建立在未来的预测和判断的基础上,使得成本估算存在各种不确定性因素,从而给决策带来风险。因此有必要

研究这些不确定因素的变化对成本估算影响的敏感程度,以提高成本估算的精度及降低决策的风险。

目前采用的方法主要是单因素敏感性分析,即在假设其他因素不变的情况下研究和分析某一项不确定性因素的变化对设备经济效果指标的影响的敏感程度<sup>[5,6]</sup>。而对于电力变压器LCC而言,由于模型涉及数据众多,数据特征各异且具有一定的相关性,因此是一个典型的多因素问题。

为分析这个多参量相互影响的问题,首先通过蒙特卡洛法对电力变压器LCC模型进行随机变量的仿真模拟,从而估计和描述LCC模型的统计量,从定性层面分析电力变压器LCC与各参量之间的关系。同时由于斯皮尔曼相关系数法可以更好地定量分析参量与模型关系的特点,因此利用基于蒙特卡洛模拟的斯皮尔曼相关系数法来量化评估各参量对电力变压器LCC模型的影响,找出对LCC模型影响大的因素以获得最大的管理效益。

## 1 电力变压器全寿命周期成本模型

通过单一的如平均值、中间值等数据分析为确定性的方法,其假定了所有未来的参量都是已知的。然而,在现实环境中,并不是所有数据都是确定已知的。如果忽略数据的变化及不确定性,将会造成错误的结果。文献[7]根据参量的不确定性建立了电力变压器区间全寿命周期成本的估算模型,但仅将主要参量设为区间数,因此得到的LCC也仅是一个区间数,无法反映LCC的分布情况。

根据电力变压器未来数据的不确定性及其特性建立了电力变压器的概率全寿命成本模型。结合电力变压器的特点,按照蒙特卡罗方法的操作步骤,首先通过主观估计方法确定各种变量的概率分布为均匀分布、三角分布和正态分布;并按照各变量的具体分布独立地随机抽取各输入变量的值,使所抽取的随机数值符合既定的概率分布;同时确定模拟次数以满足预定的精度要求。最后通过随机抽取得到的 $m$ 组随机数值,带入所建立的全寿命成本模型函数关系中,依此求得该输出模型的概率分布及风险度。

三角分布的变量分布函数为

$$x = \begin{cases} a + \sqrt{(m-a)(b-a)}r & 0 \leq r \leq \frac{m-a}{b-a} \\ b - \sqrt{(1-r)(b-m)(b-a)} & \frac{m-a}{b-a} \leq r \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $a$ 为最小值; $m$ 为最可能取值; $b$ 为最大值; $r$ 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机变量。均匀分布和正态分布的变量分布函数参见文献[8]。

采用工程估算法对电力变压器全寿命周期成本进行估算,通常电力变压器的全寿命周期成本可以分解为以下几部分。

$$C_{LC} = C_1 + C_0 + C_F + C_D \quad (2)$$

式中 $C_{LC}$ 为电力变压器全寿命周期成本; $C_1$ 为初始投入成本; $C_0$ 为运行维护成本; $C_F$ 为故障成本; $C_D$ 为退役成本。各成本计算公式参见文献[3]。

## 2 斯皮尔曼(Spearman) 相关系数

斯皮尔曼相关系数是等级相关系数,主要是根据等级资料研究两个变量间相关关系的方法,它依据两列成对等级的各对等级数之差来进行计算,因

此也称为“等级差数法”。斯皮尔曼相关系数对数据条件的要求没有积差相关系数严格,只要两个变量的观测值是成对的等级评定资料,或者是由连续变量观测资料转化得到的等级资料,不论两个变量的总体分布形态、样本容量的大小如何,都可以用斯皮尔曼相关系数来进行研究<sup>[9]</sup>。在实际应用中,输入参量的变化对LCC计算结果的影响程度,往往并不能体现在LCC变化的绝对值,因此在常用的单因素敏感度分析中,某一输入变量的敏感度系数与参量本身在LCC中所占的绝对比例并不一致,使得敏感度分析失效;同时由于传统的单因素或多因素敏感性分析方法无法满足高强度的计算需求及空间复杂度,限制了对其模型参量间相互关系及参数敏感性的理解,而基于蒙特卡洛模拟的斯皮尔曼相关系数法能够有效地避免这种现象的发生。

斯皮尔曼相关系数的计算步骤如下<sup>[10]</sup>。

(1) 首先应根据评价决策对象的基本情况,选择能够全面反映技术方案经济效果的指标,作为敏感性分析中的评价指标对各个待分析的输入参量设置概率分布函数,进行蒙特卡洛分析<sup>[11]</sup>。

(2) 把输入参量的统计数据 and LCC 的分析结果分别按等级次序编号。

(3) 按顺序求出两个标志的每对等级编号的差。

(4) 按式(3)计算相关系数。

$$r_{sj} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (3)$$

式中 $r_{sj}$ 为第 $j$ 个相关系数,表示第 $j$ 个输入参量同预测参量之间的相关系数,一共有 $k$ 个待分析的输入参量; $d_i = X_i - Y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )为输入变量分别与LCC的等级之差, $n$ 为样本容量。 $r_{sj}$ 反映了输入参量对LCC的实际敏感性,如果该数值较大,则说明输入参量对LCC变化非常敏感,该数值的变化将给LCC带来剧烈的变化,在考虑LCC决策问题时,必须认真对待。

所有各对等级的相关系数都一样,取值-1到+1之间, $r_s$ 为正表示正相关, $r_s$ 为负表示负相关, $r_s$ 等于零为零相关,区别是它是建立在等级的基础上计算的,较适用于反映序列变量的相关性。若相关系数绝对值大于0.8,则认为两个变量之间具有较强的相关关系;相关系数小于0.3,则认为两个变量之间有较弱的相关关系。

(5) 根据各个参量对预测参量(LCC)的相关系数,计算各个输入参量的敏感度系数归一化为

$$\alpha_i = \frac{r_{sj}^2}{\sum_{i=1}^k r_{sj}^2} \quad (4)$$

在得到各参数的敏感度系数后,再利用各参数的最小值  $P_{imin}$  和最大值  $P_{imax}$ ,可以计算出该参数对LCC影响的最小值和最大值为

$$\begin{aligned} |\alpha_i \times P_{imin}| &= SL_{P_{imin}} \quad i=1, 2, \dots, m \\ |\alpha_i \times P_{imax}| &= SL_{P_{imax}} \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5)$$

上两式计算的结果反映了各参数对LCC绝对值的影响规律。由前述对敏感性函数分析的结论并进一步利用式(5)可以得到式(6)。

$$S_i = SL_{P_{imin}} - SL_{P_{imax}} \quad (6)$$

式(6)反映了参数所占LCC份额的大小,如果该数值较大,则说明受参数  $X_i$  影响的费用占了LCC的大部分,准确计算LCC的具体数值时,必须认真考虑;反之可不必花费大量精力确认该数据。

因此可以得出以下结论。

(1) 如果输入参量的  $SL_{P_{imin}} - SL_{P_{imax}}$  和  $r_{sj}$  均比较大,则该参数非常重要,对决策的影响很大,必须认真对待;反之则说明该参数不太重要,则不必花费太多的精力。

(2) 如果输入参量的  $SL_{P_{imin}} - SL_{P_{imax}}$  很大,  $r_{sj}$  很小,说明尽管该参数占LCC的大部分,但对LCC的变化影响不大,在进行方案比较时,如果每个方案该参数差别不大,则可不必考虑,以减少LCC分析的工作量。

(3) 如果输入参量的  $SL_{P_{imin}} - SL_{P_{imax}}$  不大,  $r_{sj}$  较大,说明尽管该参数所造成的费用不占LCC的大部分,但参数的变化对LCC影响较大,当进行方案比较时,应仔细考虑,以保证分析结果的准确合理性。

(4) 如果输入参量的  $SL_{P_{imin}} - SL_{P_{imax}}$  和  $r_{sj}$  均较小,则说明该参数不重要,在对LCC估算的准确性要求不很高时,例如粗略估算LCC或方案间优选时可不予考虑。

### 3 实例估算

以某变电站500 kV 1号主变压器A、B、C三个单相变压器为例进行LCC估算。该变电站1号主变压器于2004年6月19日投入运行,每相型号为ODFPS-250000/500,制造厂家为常州东芝变

压器厂。该站1号主变压器的额定容量为750 kVA,额定空载损耗和负载损耗分别是66.64 kW和198.2 kW。

初始投入成本包括设备购置费、安装调试费及其他费用。变压器的运输费,一般按厂家提供的参考价计算,这里将运输费直接划入设备购置费内,变压器的安装费用参考《电力建设工程预算定额第三册电气设备安装工程(2006版)》,由于购置成本变化不大,因此设为正态分布。假定变压器计划停运时,不造成损失,排除由人为因素引起的异常故障率。假定每次发生故障在24 h内修复,故障带来的中断供电时间设定为24 h,因此变压器的年故障中断运行时间可根据变压器的年故障停运次数进行转化运算。全国2004—2008年5年间的变压器可靠性统计分析数据<sup>[12]</sup>如表1所示。变压器每年的故障修复费用参考《火电工程限额设计参考造价指标(2007年水平)》的相关规定。报废成本参考电力工程造价与定额管理总站编制的2007版《电网工程建设预算编制与计算标准使用指南》。中国《资产评估操作规范意见(试行)》中第114条规定,对于非亏损行业“折现率可以行业平均资金利润率为基础,再加上3%~5%的风险报酬率。除有确凿证据表明具有高收益水平或高风险外,折现率一般不高于15%”。

LCC的估算需要大量数据的支持,但关于变压器的LCC的研究还处于探索阶段,相关数据的收集整理有待在生产管理中总结和完善的。因此在缺乏部分数据的情况下,通过与相关专家咨询讨论,对该变电站1号主变压器的LCC估算中的一些参数进行简化处理。三角形分布通常被认为是很多成本和持续时间分布的最佳选择,尤其是当数据比较模糊或无法确定其变化时,如电价、残值等,因此这里主要应用三角形分布作为LCC主要参量的分布。

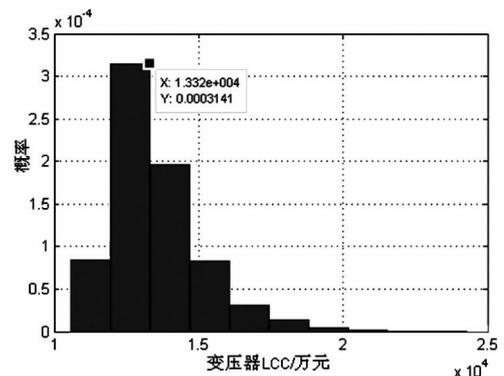


图1 变压器的LCC的蒙特卡罗模拟5 000次结果

表1 单相500 kV变压器的可靠性指标

变压器类型	统计台数/台	可用系数 /%	强迫停运率 /(次·(百台·a) <sup>-1</sup> )	计划停运系数 /%	非计划停用系数 /%
单相500 kV	1 699	99.598	1.252	0.358	0.045

从图1中可知,变压器的最可能全寿命成本区间为(11 860,13 320)万元。在经济学领域,定义风险度  $FD = \text{方差}/\text{期望}$ ,也称为变异系数,以反映单位均值上的离散程度,可以消除均值不同对两个或多个资料变异程度比较的影响;因此当风险度越大时,说明LCC的不确定性越大;根据以上仿真结果,蒙特卡罗模拟5 000次的  $FD = 0.1189$ ,表明所得的该台电力变压器的全寿命周期成本的风险度较低。

图2与图3为变压器LCC与主要输入参数的蒙特卡罗模拟5 000次的散点图,从图中可知负载率与变压器的LCC具有明显的正相关的关系,折现率与变压器的LCC具有负相关的关系,说明这两个变量对电力变压器全寿命周期成本模型的准确建立具有重要影响,需要着重考虑。

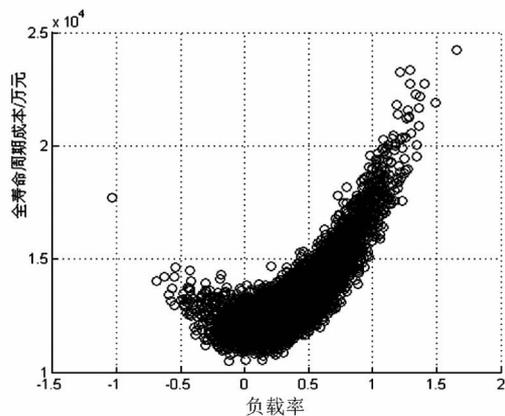


图2 负载率与LCC的关系

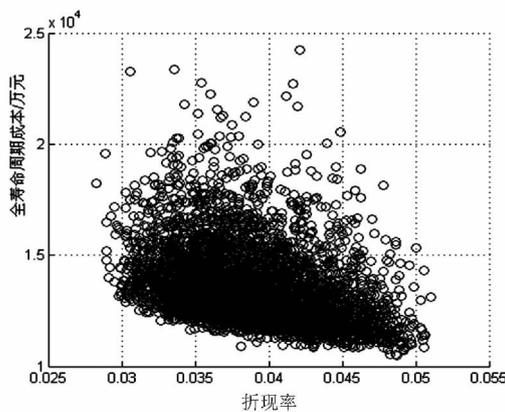


图3 折现率与LCC的关系

图4和图5为相应的参量敏感性与输入参量占LCC的比例。通过对所得输入参量斯皮尔曼相关系

数的绝对值进行排序可知,负载率与折现率对模型的影响最大,同时从输入参量占LCC比例可以看出,负载率占LCC的比例较大,因此在采购时应选择损耗较小的变压器,同时在电力变压器的运行中也需要进行深入的研究,使其保持在最佳负载率的区域以降低其LCC;虽然购置成本及调试费的敏感性较小,但占LCC的比例较大,因此也需要重点考虑,以保证分析结果的准确合理性,而年故障时间与平均修复成本的斯皮尔曼相关系数和占LCC份额都较小,因此说明该参数对模型的影响不大。

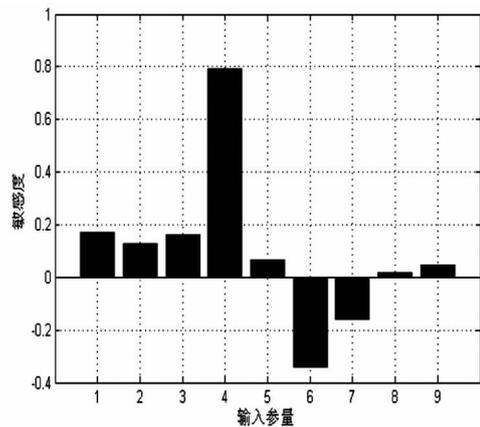


图4 基于Spearman的LCC参量敏感度

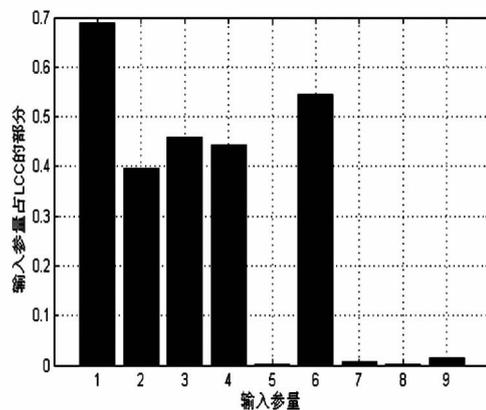


图5 输入参量占LCC比例

## 4 结论

电力变压器投资成本较高,因此应从采购阶段就综合考虑其LCC的各项成本以及成本的分布,而进行成本参量的不确定性与敏感性分析可有效辨识

各参量的重要度,从而在此基础上对其加强管理以实现降低电力变压器 LCC 的目标。

对建立的电力变压器全寿命周期成本模型通过蒙特卡洛模拟与斯皮尔曼相关系数法进行了不确定与敏感性分析,确定对全寿命成本影响较大的关键参量;按重要性大小对各参量进行排序,确定了导致成本风险的关键因素;同时通过实例可知基于蒙特卡洛模拟的斯皮尔曼相关系数法可以满足高强度的计算需求及空间复杂度,因此更适于处理多变量功能函数复杂的问题,物理意义明确,方法具有普遍的适用性。

参考文献

[1] 王佳明,刘文颖,魏帆,等. 基于寿命周期成本管理的输变电设备状态检修策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5): 77-79.

[2] 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.

[3] Weekes T., Molinski T., Li X., et al. Risk Assessment Using Transformer Loss of Life Data [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(2): 27-31.

[4] 黄金泉. LCC 在上海地区的应用与发展[J]. 上海电力,2003(3): 269-270.

[5] Khaled S., Tarek Z.. Simulation as a Tool for Life Cycle

(上接第16页)

[3] 杨庆,赵杰,司马文霞,等. 云广特高压直流输电线路反击耐雷性能[J]. 高电压技术,2008,34(7): 1330-1335.

[4] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985.

[5] 吴文辉,曹祥麟. 电力系统电磁暂态计算与 EMTP 应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[6] Canadian - American EMTP Users Group. ATP - EMTP Rule Book [M]. [S.l.]: Preliminar Release,1997.

[7] 谭进,张焕青,刘玉君,等. ±500 kV 三沪 II 回同塔双回直流输电线路防雷分析[J]. 高电压技术,2010,36

Cost Analysis [C]. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008: 2497-2503.

[6] 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.

[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.

[8] Emblemsv J. Life - cycle Costing: Using Activity - based Costing and Monte Carlo Methods to Manage Future Costs and Risks [M]. Wiley, 2003.

[9] 王静龙,梁小筠. 非参数统计分析[M]. 北京:高等教育出版社,2005: 60-62.

[10] Khan F N, Lau A P T, Zhaohui Li. Statistical Analysis of Optical Signal - to - noise Ratio Monitoring Using Delay - tap Sampling [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(3): 149-151.

[11] 刘妍. 桥梁全寿命周期成本风险分析研究[D]. 北京:北京工业大学,2009.

[12] 2008 年全国输变电设施可靠性分析. 来源: <http://www.chinacir.com.cn/freereport/201022171332.shtml>.

作者简介:

舒萍(1977),男,主要从事变压器运行管理研究。

(收稿日期:2013-06-26)

(9):2173-2179.

[8] 黄瑞梅. 输电线路防雷接地技术研究[J]. 水电能源科学,2009,27(5):207-210.

[9] 陈锡磊,王东举,赵斌财,等. 定海—甬东特大跨越线路段的耐雷性能[J]. 电力建设,2010,31(6): 6-10.

[10] 司马文霞,谢博,杨庆,等. 特高压输电线路雷电过电压的分类识别方法[J]. 高电压技术,2010,36(2): 306-312.

作者简介:

刘守豹(1983),男,博士,工程师,从事过电压及工程电磁场计算方面的工作。

(收稿日期:2013-06-28)