

基于系统动力学的电力变压器全寿命周期影响因素分析

曾建生 马 兰 王昭雷

(国网河北省电力有限公司超高压分公司)

摘要: 为了实现电力变压器的维修方案、全寿命周期成本 (LCC) 和可靠性综合最优, 针对传统研究中未考虑维修对 LCC 与可靠性的影响以及对其寿命周期内所产生的成本分析不够全面的问题, 提出了基于系统动力学的电力变压器全寿命周期成本 LCC 模型, 同时考虑到维修对役龄回退与故障率的影响, 建立了一种线性定量衰减的电力变压器役龄回退模型。最后通过 VENSIM 软件对变压器 LCC 影响因素进行仿真分析, 确定了各个电力变压器全寿命周期成本组成因素和不同检修方案对 LCC 的影响程度, 并得出关键成本影响因素和最优检修方案, 为 LCC 估算和管理控制电力变压器投资决策提供了重要的依据和基础。

关键词: 电力变压器; 全寿命周期成本; 系统动力学; 影响因素

0 引言

电力变压器在电力系统中担任着电力传输以及能量转换的不可或缺的角色, 具有投资大、运行维护复杂、服役时间长等特点, 其成本在整个电力系统的投资中占有相当重要的比例^[1]。全寿命周期成本 (Life Cycle Cost, LCC) 是产品从设计、开发、制造、使用、维修、保障直至报废的过程中所发生的费用的总和。对变压器进行全寿命周期成本的研究及有效管理可带来更好的经济效益, 是电力系统可持续发展的有力保障^[2]。由于电力变压器 LCC 模型中的参量与时间有密切关系, 导致在 LCC 分析中存在各种随着时间变化的不确定性因素, 故确定这些因素以及其对 LCC 的影响程度, 对提高成本估算的精度及降低决策的风险具有重要意义, 同时对影响程度较大的因素加以权

衡和控制从而有效地降低 LCC。

影响电力变压器 LCC 的因素有很多, 目前针对电力变压器 LCC 影响因素分析有很多的研究。文献 [3] 使用蒙特卡罗方法对 LCC 模型的概率分布进行模拟统计并对影响因子进行敏感性分析, 模拟出运营成本占较大比重, 从而得出通过降低运营成本的构成因素值可以减少 LCC 成本这一结论, 但仅分析出构成 LCC 的三大成本对 LCC 的影响程度, 没有具体分析各因素对 LCC 的影响。文献 [4] 应用系统动力学对 LCC 水平进行仿真, 通过对 LCC 影响因素进行动态分析得出各因素对 LCC 影响的影响程度。但其无法直观看出各因素之间的实际关系, 且无法体现各因素与 LCC 之间的动态关系。文献 [5] 构建配电网变压器 LCC 的系统动力学模型并为设备选型提供了参考, 但是在变压器 LCC

建模中将年检修成本视为固定的支出，忽略了维修对变压器故障率和等效役龄的影响，进而导致模拟 LCC 不够准确。

综上所述，目前学者们在变压器全寿命周期成本影响因素方面做了大量的研究，提出了多种算法对其进行分析，但大部分都仅依据数据进行分析，而对所研究的变压器 LCC 缺少系统的思考，无法直观地看出各因素与 LCC 之间的关系，同时忽略了检修对 LCC 的影响。

针对这些问题，基于系统动力学理论，建立了 LCC 系统模型，其中考虑了检修对 LCC 的影响，着重分析了维修次数和维修时间对役龄回退和故障率的影响，在建模的过程中增加了役龄回退模型。建立了更为精准的电力变压器全寿命周期模型；实现了系统中各因素之间的因果反馈关系分析，通过构建系统流程图和方程建立系统动力学模型，模拟计算得出 LCC 及各子系统成本，直观地反映出 LCC 及其影响因素的变化过程，同时分析了检修时间对 LCC 的影响，最终找出关键成本影响因素，为 LCC 管理与控制提供基础，同时为考虑经济性的电力变压器检修决策提供参考思路^[6]。

1 系统动力学研究变压器 LCC 的适用性

系统动力学 (System Dynamics, SD) 是以系统工程中的相关方法作为理论基础，其把系统看成一个具有多重信息因果反馈机制，通过系统的分析后建立因果关系反馈图并建立相应的系统动力学模型。最后在 Vensim 软件上实现对真实系统的仿真。从而可以研究系统的结构、功能和行为之间的动态关系，以寻求最优结果。

变压器的 LCC 包含着多种成本因素，且它们之间存在着一些必然的联系，因此在分析影响因素时应先将变压器 LCC 看成一个整体，接着再对其进行系

统性的分析。而系统动力学方法就是提供了这样一种系统且具有动态性的科学分析方法，可以在将系统中的各个因素联系在一起的同时分析各因素之间存在的逻辑关系，从而可以对系统进行整体性的研究。因此系统动力学的方法适用于研究变压器的 LCC^[7]。

2 电力变压器 LCC 模型构建

电力变压器的 LCC 是一个完整且会随时间发生动态变化的系统，且系统中的各个影响因素之间相互作用且相互影响。目前学者们在优化全寿命周期成本方面做了大量研究，文献 [8] 将杜鹃搜索算法用于优化运维策略的检修时间、检修程度和服役寿命参数，最终结果表明，杜鹃算法较遗传算法和粒子群得到的年均成本更低，寿命效率指数更高。本节首先介绍了 LCC 的相关概念，分析了电力变压器成本的构成因素，其次考虑到资金的时间价值以及维修方案对役龄回退量产生的影响，建立了一种新的役龄回退模型，通过等效役龄将维修方案，LCC 和可靠性能三者联系起来，最终构建了更为全面的电力变压器 LCC 模型。

2.1 初始投入成本 (C_1)

变压器的初始投入成本是指变压器在开始投运之前所发生的所有费用，其中包含变压器本身及附属配置的采购费、安装调试费与其他有关费用。

2.2 运行成本 (C_0)

运行成本主要是指在变压器建成运行后到变压器报废回收过程中所产生的人工成本和功率损耗成本。其中，功率损耗成本包括固定功率损耗成本 CFC 以及可变功率损耗成本 CVC。

其中，固定功率损耗成本是由空载损耗引起的，其计算为：

$$C_{FC} = a \times P_g \times (8760T_s) = a \times P_g \times \left(8760 \times \left(8760 \times \frac{\lambda}{\lambda + 8760/T_R} \right) \right) \quad (1)$$

式中， a 为售电电价； P_g 为固定功率损耗； T_s

为变压器的年停运时间； λ 为故障率； T_R 为故障修复时间。可变功率损耗成本的计算为：

$$C_{VC} = a \times t_{\max} \times P_{L,\max} = a \times t_{\max} \times \frac{S \times y \times R}{U^2} \quad (2)$$

式中， E 为可变功率的损耗电量； t_{\max} 为最大负荷损耗时间； $P_{L,\max}$ 为最大负荷下的有功功率损耗； S 为变压器额定容量； y 为变压器最大负载率； U 、 R 分别为额定电压和等效电阻。

运行人员成本主要取决于变压器的类型，所以对于同一类型变压器的运行人员成本取固定数值。

2.3 检修成本 (C_M)

变压器的初始投入成本是指变压器在开始投运之前所发生的所有费用，其中包含了变压器本身及附属配置的采购费、安装调试费与其他有关费用。

$$C_M = C_1 + C_m \quad (3)$$

式中， C_1 为大修总费用； C_m 为小修总费用。

2.4 停电损失成本 (C_F)

停电损失成本是变压器在发生故障导致供电中断时所造成的损失，记 $\cos\phi$ 为功率因数，它可以表示为：

$$C_F = a \times S \times \cos\phi \times y \times T_s \quad (4)$$

2.5 退役成本 (C_D)

电力变压器的退役处置成本指电力变压器在其寿命周期结束后的拆解以及回收等处理费用，其中主要包括报废成本和变压器的残值。根据《电网工程建设预算编制与计算标准使用指南》可知，当电力变压器达到寿命年限时间，则其残值约为采购费的 5%，清理费费率取为设备安装费的 32%^[9]。

2.6 基于折现率的全寿命周期成本

为了实现电力变压器 LCC 更为准确的分析，需要考虑资金的时间价值，即将不同时刻的成本折算在同一时刻上。资金的时间价值表现为所取得的利息，称为折现率^[10]。因此在计算电力变压器 LCC 时，为保证评估的准确性，需要考虑电力变压器 LCC 现值。

综上所述，电力变压器 LCC 可按式 (5) 表示：

$$LCC = C_1 + \sum_{n=1}^L (C_o + C_f) \times \frac{1}{(1+i)^n} + C_M + C_D \times \frac{1}{(1+i)^L} \quad (5)$$

2.7 役龄回退对成本的影响分析

在以往的设备全寿命周期成本相关研究中，学者们总是将变压器的年维修成本视为固定的支出，或是采用固定的役龄回退因子对变压器的役龄进行描述，但在工程实际中，随着对变压器的维修次数的增多，维修效果逐渐下降，其相应年限的故障率也会随之变化，对电力变压器的全寿命周期成本造成一定影响，故本文提出了一种新的线性定量衰减的电力变压器役龄回退模型。

电力变压器第 i 次维修后的役龄回退量 τ_i 可用式

(6) 计算^[11]：

$$\tau_i = \begin{cases} \eta_i T_i & i=1 \\ \eta_1 T_1 + \dots + \eta_i T_{(i-1)} - \frac{i(i-1)}{2} k & 1 < i \leq x \end{cases} \quad (6)$$

式中， τ_i 为第 i 次大修后的役龄回退量； $\tau_i(i-1)$ 为第 i 次大修至第 $(i-1)$ 次大修的维修间隔； η_i 为第 i 次大修时的役龄回退因子； k 为衰减因子； x 为变压器在其运行期间内进行的大修次数， $x=2$ 。

电力变压器第 i 次维修后的等效役龄 e_i 为：

$$e_i = t_n - \tau_i \quad (7)$$

式中， t_n 为变压器的名义役龄； i 为维修次数。

(1) 当变压器的维修方式为大修方式时

一般情况下，电力变压器单次大修的费用可用式

(8) 计算：

$$C_1 = 0.06 \times C_1 \quad (8)$$

式中， C_1 为电力变压器单次大修费用； C_1 为初始投入成本。

由式 (6)，变压器经两次大修后的役龄回退量分别为：

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \eta_1 T_1 = \eta_1 t_1 \\ \tau_2 &= \eta_1 T_1 + \eta_2 T_{21} - k = \eta_1 t_1 + \eta_2 (t_2 - t_1) - k \end{aligned} \quad (9)$$

(2) 当变压器的维修方式为小修方式时
通常情况下变压器每年都需要进行一次小修, 其每年的小修费用为:

$$C_m = C_1 \times \beta \times e_a \quad (10)$$

式中, C_1 为初始购置成本; β 为年小修费用系数; e_a 为电力变压器等效役龄。

小修导致的役龄回退表示为:

$$\tau_j = \begin{cases} \eta_j T_j & j=1 \\ \eta T_1 + \dots + \eta_j T_{j(j-1)} - \frac{j(j-1)}{2} k & 1 < j \leq y \end{cases} \quad (11)$$

假定变压器每年进行一次小修, 小修役龄回退因子为 η_0 , m 、 n 、 p 分别表示变压器在不同大修间隔内运行时所进行的小修次数, 则当变压器运行到 t 时刻其对应时间段内小修役龄回退量 τ_{sm} 、 τ_{sn} 、 τ_{sp} 具体分析如下:

第一次大修之前, 小修的役龄回退量为:

$$\begin{aligned} \tau_{sm} &= \eta T_1 + \dots + \eta_m T_{m(m-1)} - \frac{m(m-1)}{2} k \\ &= \sum_{j=1}^m \eta_0 T_{j(j-1)} - \frac{m(m-1)}{2} k \end{aligned} \quad (12)$$

此时的等效役龄为:

$$e_a = t_n - \left(\sum_{j=1}^m \eta_0 T_{j(j-1)} - \frac{m(m-1)}{2} k \right) \quad (13)$$

式中, $m=[t_n]$, 且 $m \leq [t_n]$, $[\]$ 表示取整符号。

第一次大修与第二次大修之间, 小修役龄回退量为:

$$\begin{aligned} \tau_{sn} &= \eta T_1 + \dots + \eta_n T_{n(n-1)} - \frac{n(n-1)}{2} k \\ &= \sum_{j=1}^n \eta_0 T_{j(j-1)} - \frac{n(n-1)}{2} k \end{aligned} \quad (14)$$

此时的等效役龄为:

$$e_a = t_n - \eta t_1 - \left(\sum_{j=1}^n \eta_0 T_{j(j-1)} - \frac{n(n-1)}{2} k \right) \quad (15)$$

式中, $n=[t_n]$, 且 $[t_1] < n < [t_2]$ 。

第二次大修之后, 小修役龄回退量为:

$$\tau_{sp} = \sum_{j=1}^p \eta_0 T_{j(j-1)} - \frac{p(p-1)}{2} k \quad (16)$$

式中, $p=[t_n]$, 且 $[t_2] < p \leq [L]$ 。

因此, 电力变压器的小修费用可表示为:

$$e_a = t_n + (\eta_2 - \eta_1)t_1 - \eta_2 t_2 + k - \left(\sum_{j=1}^p \eta_0 T_{j(j-1)} - \frac{p(p-1)}{2} k \right) \quad (17)$$

年小修费用为:

$$C_m = C_1 \times \beta \times e_a = \begin{cases} C_1 \times \beta \times (t_n - \tau_{sm}) & t_n \leq t_1 \\ C_1 \times \beta \times (t_n - \eta t_1 - \tau_{sn}) & t_1 < t_n \leq t_2 \\ C_1 \times \beta \times [t_n + (\eta_2 - \eta_1)t_1 - \eta_2 t_2 + k - \tau_{sp}] & t_n > t_2 \end{cases} \quad (18)$$

式 (18) 是年小修费用, 则寿命周期内考虑资金的时间价值的总小修费用是:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^L C_m(t) &= \beta \times C_1 \times \left(\sum_{m=1}^{[t]} \frac{m - \tau_{sm}}{(1+i)^m} + \sum_{n=[t]+1}^{[t_2]} \frac{n - \eta t_1 - \tau_{sn}}{(1+i)^n} + \right. \\ &\quad \left. \sum_{p=[t_2]+1}^{[L]} \frac{p + (\eta_2 - \eta_1)t_1 - \eta_2 t_2 + k - \tau_{sp}}{(1+i)^p} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

综上, 根据以上对电力变压器大修和小修的分析, 检修成本可如式 (20) 所示:

$$C_M = \sum_{i=1}^L \frac{C_m(t)}{(1+i)^t} + \frac{C_1}{(1+i)^{t_1}} + \frac{C_1}{(1+i)^{t_2}} \quad (20)$$

式中, $i=1, 2, 3$ 表示考虑折现率的第 i 次大修时的费用。

此外, 为了充分考虑变压器的可靠性, 本文选取故障率作为相应指标, 由于电力变压器的故障率 λ 是等效役龄 e_a 的函数, 故可得变压器经过维修后的故障率为:

$$\lambda = \begin{cases} 0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n - \tau_{sm})} - 1) & t_n \leq t_1 \\ 0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n - \eta t_1 - \tau_{sn})} - 1) & t_1 < t_n \leq t_2 \\ 0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n + (\eta_2 - \eta_1)t_1 - \eta_2 t_2 + k - \tau_{sp})} - 1) & t_2 < t_n \end{cases} \quad (21)$$

将式 (21) 代入式 (1), 即可得固定功率损耗成本为:

$$C_{FC} = \begin{cases} a \times P_g \times \left(8760^2 \times \frac{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n - \tau_{sm})} - 1)}{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n - \tau_{sm})} - 1) + 8760 / T_R} \right) & t_n \leq t_1 \\ a \times P_g \times \left(8760^2 \times \frac{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n - \eta t_1 - \tau_{sn})} - 1)}{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n - \eta t_1 - \tau_{sn})} - 1) + 8760 / T_R} \right) & t_1 < t_n \leq t_2 \\ \left(8760^2 \times \frac{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n + (\eta_2 - \eta_1)t_1 - \eta_2 t_2 + k - \tau_{sp})} - 1)}{0.00294 + 0.01 \times (e^{0.05(t_n + (\eta_2 - \eta_1)t_1 - \eta_2 t_2 + k - \tau_{sp})} - 1) + 8760 / T_R} \right) & t_2 < t_n \end{cases} \quad (22)$$

式中, a 为售电电价; P_g 为固定功率损耗; T_s 为变压器的年停运时间; λ 为故障率; T_R 为故障修复时间。

故可建立电力变压器检修决策成本模型为:

$$\begin{cases} \min LCC = C_1 + \sum_{n=1}^L (C_0 + C_F) \times \frac{1}{(1+i)^n} + C_M + C_D \times \frac{1}{(1+i)^L} \\ \lambda(e_a) < \lambda_0 \end{cases} \quad (23)$$

式中, λ_0 为故障率阈值; $\lambda(e_a)$ 表示电力变压器的故障率 λ 为等效役龄 e_a 的函数。

3 基于系统动力学的电力变压器 LCC 模型构建

系统动力学中的模型主要有系统的因果关系图和存量流量图, 因果关系图通过箭头将各因素联系在一起后形成一个整体, 从而得出各因素之间的影响关系; 存量流量图是对因果关系图的进一步诠释, 通过

其可以找出状态变量、速率流量、辅助变量以及常量之间的关系, 更重要的是通过图中的每个因素赋值, 并进行仿真模拟, 可以得出各因素之间的定量关系, 从而确定出系统中的关键影响因素以及影响程度^[12]。

3.1 因果关系分析

根据以上对变压器全寿命周期成本各因素的分析, 建立基于全寿命周期成本的变压器系统动力学模型。系统动力学通过因果链建立系统各组成部分之间的明确且详尽的函数关系, 如图 1 所示即为变压器全寿命周期成本因果关系图, 带“+”的箭头代表正的因果关系, 带“-”的箭头代表负的因果关系。

3.2 系统流量图和方程的构建

存量流量图是基于因果关系图所建立的, 通过分析画出对应的存量流量图, 并对其内容进行丰富和修整, 最终得到 LCC 总存量流量图, 如图 2 所示。



图 1 电力变压器 LCC 的因果关系图

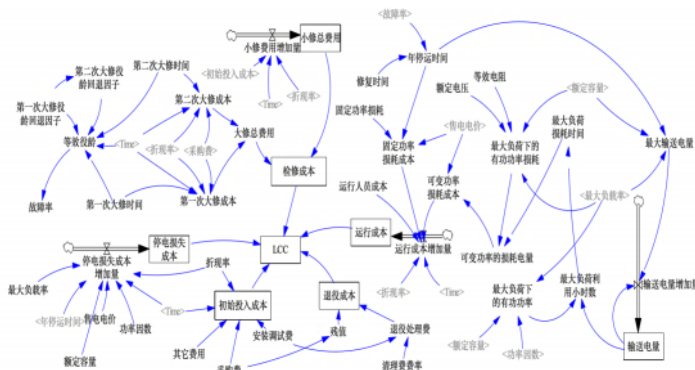


图 2 电力变压器 LCC 存量流量图

4 系统模拟结果与分析

以某 120MVA 的电力变压器为例，参数见表 1^[13]。在模型中输入参数，模拟期限设定为 1 到 20 年，并假设分别在第 8 年和第 15 年对变压器共进行两次大修。

表 1 某 120 MVA 的电力变压器参数

参数	数值	参数	数值
额定容量/MVA	120	固定功率损耗/kW	0.6
购置费/万元	898	故障修复时间/h	50
安装调试费/万元	55	输送电量/kWh	3038270
其他费用/万元	154	售电价/ (元·(kW·h) ⁻¹)	0.52
功率因数	0.75	等效电阻/ Ω	2.06
负载率	0.55	额定电压/kV	8760
折现率	0.08	变压器寿命/年	20

通过软件运行，本模型通过了机械错误检验、量纲一致性检验和有效性检验。其模拟结果分为三种情况如下：

(1) 变压器 LCC 的组成成本

由图 3 可得电力变压器全寿命周期成本各成本基于时间的动态变化关系。其中初始投入成本（曲线 1）由于考虑了资金折现率的影响，随时间呈下降趋势；运行成本（曲线 2）和停电损失成本（曲线 4）随时间呈上升趋势，这是变压器发生故障导致供电中断而造成损失逐步积累的结果；检修成本（曲线 3）中除了包括每年例行的小修成本，还包括两次大修的成本，故在第 8 年和第 15 年有明显上升趋势；退役成本（曲线 5）仅发生在期末，且由于包含退役时的残值，导致其结果为负值。曲线 6 为变压器全寿命周期总成本变化，即随时间的增加逐年上升，因为考虑了时间价值，所以其增长速度有所放缓。同时可得电力变压器 LCC 各个成本的结构分布，如表 2 所示。

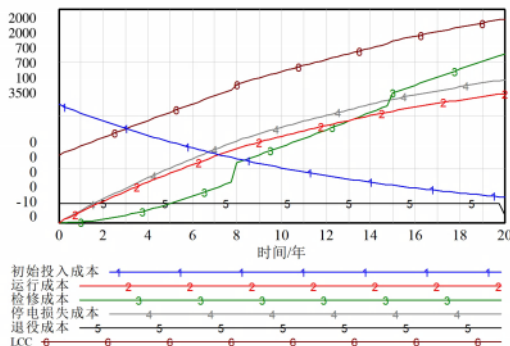


图 3 变压器 LCC 各组成成本随时间的变化

表 2 电力变压器 LCC 成本构成

成本类别	数额 / 万元	所占比重 / %
初始投入成本	1107	33.10
运行成本	1293.1	36.1
检修成本	553.1	16.50
停电损失成本	487.7	14.10
退役成本	-5.9	0.2
电力变压器 LCC 总成本	3435	100

由表 2 可得在电力变压器 LCC 中，各成本因素占总成本份额的大小。其中，初始投入成本、运行成本、检修成本和停电损失成本所占比重分别为 33.10%、36.10%、16.50%、14.10%，共占 99.80%。因此，在对电力变压器 LCC 总成本进行分析时，应该重点考虑的因素为初始投入成本、运行成本、检修成本和停电损失成本，而退役成本忽略不计。

(2) 检修对役龄回退及故障率的影响

变压器服役期间，对电力变压器的每一次大修都会使变压器的役龄有一定程度的回退现象，其相应年限的故障率也随之变化，进而影响电力变压器的全寿命周期成本，如图 4 所示。分别在第 8 年和第 15 年对其进行大修会使变压器的等效役龄和故障率减小，且第一次大修产生的役龄回退要比第二次大修产生的役龄回退大，这是由于随着维修次数的增多，维修效果逐渐下降，即电力变压器的性能随着对其进行维修

的次数的增加而呈现出一种衰退的情况与实际运行情况相一致。

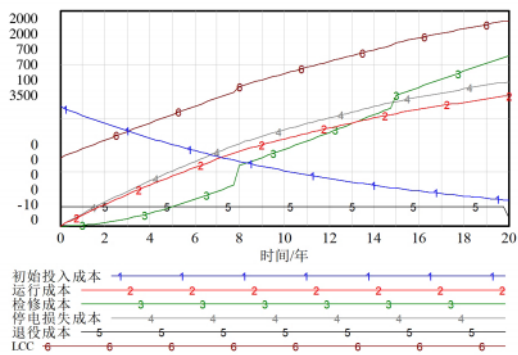


图 4 等效役龄和故障率

(3) LCC 影响因素分析

由电力变压器 LCC 各个成本的结构分布可知变压器的初始投入成本占 LCC 的比重较大，但其属于一次性成本，可以根据工程实践较准确估算；退役成本所占比重较小，对总成本的影响可以忽略；运行成本和停电损失成本不仅所占比重较大，且含有较多不确定性因素^[14]。

1) 本文通过对折现率、功率因数、负载率、售电电价这四个不确定性较大因素进行研究，模拟分析实际变压器 LCC 输出的变化情况，仿真结果如图 5~图 8 所示。

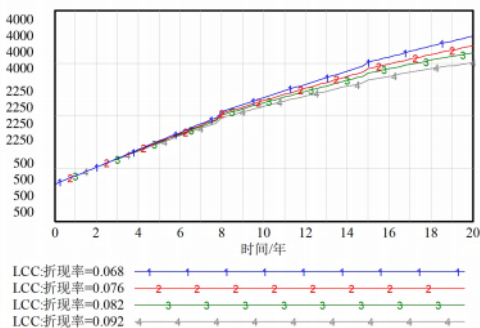


图 5 折现率对 LCC 的影响

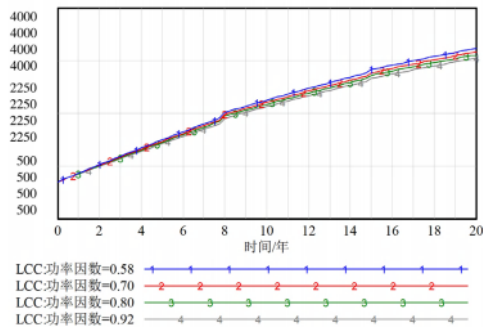


图 6 功率因数对 LCC 的影响

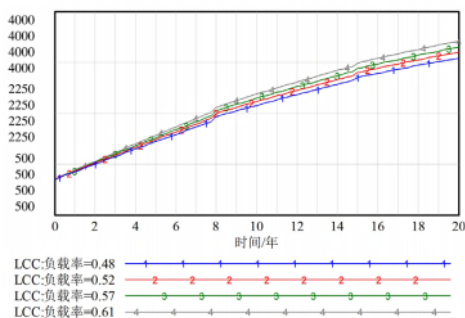


图 7 负载率对 LCC 的影响

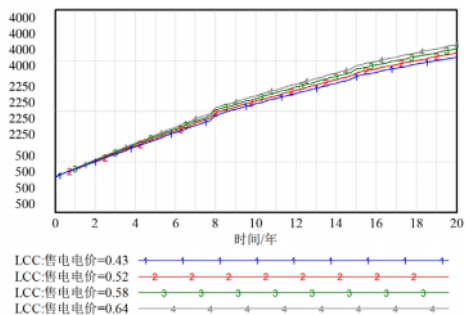


图 8 售电电价对 LCC 的影响

由图 5~图 8 可知，折现率与 LCC 呈负相关的关系，且与成本的关系趋势变化较明显，即对 LCC 有较大的影响；功率因数、负载率及售电电价与 LCC 呈现正相关的关系，其中负载率对 LCC 有较大影响，功率因数和售电电价与 LCC 的关系相比较为平缓，对 LCC 影响较小；不仅进一步印证了前人研究得出的结论，而且能够直观地看出各因素对 LCC 随时间

的动态变化，得出关键因素。

2) 通过模拟不同的检修策略，可以得到故障率、LCC 与时间之间的动态变化。

由表 3 可知，针对同一变压器，选取不同的大修时间会得到不同的 LCC，即不同的检修策略会对 LCC 有一定的影响。在这三种检修方案中，第一种检修方案为最佳方案，其 LCC 最小，为 3414.2 万元。

表 3 电力变压器 LCC 的三种检修策略

参数条	第一次大修时间 / 年	第二次大修时间 / 年	LCC / 万元
condition 1	5	12	3414.2
condition 2	11	16	3532.8
condition 3	8	15	3446.4

由图 9 可得，从单个检修策略来看，由于检修成本中除了包括每年例行的小修成本，还包括两次大修的成本，故在大修时间点处 LCC 有明显的上升趋势，同时可看出会出现小的振荡，这是由于折现率的不确定性所导致。由于考虑了时间价值，其增长速度会随时间的增加而有所放缓，在期末时由于退役成本使其变化更加平缓。同时可以看到在大修时间点处的故障率有明显下降趋势，这是因为大修会使变压器等效役龄和故障率减小。综上，单个检修策略的整体趋势符合之前的研究结果。

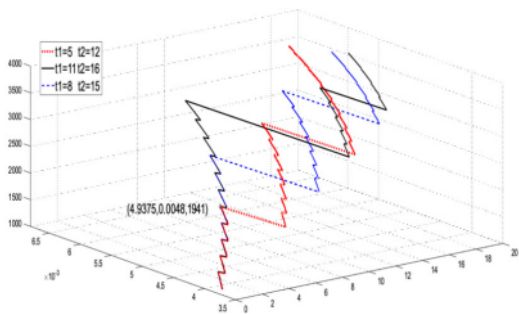


图 9 不同检修策略下的故障率和 LCC

多组检修策略对比看，针对同一变压器，在实际检修策略中的最小大修时间点第 4.9375 年之前，三

条曲线是相重合的，此段时间里三组检修策略有相同的故障率和 LCC，即在最小大修时间点之前变压器的故障率和 LCC 不受外界其他因素的影响；而随后因为检修策略的不同导致转折点的不同，从而呈现不同的故障率和 LCC。

所以选择适当的检修时间不仅可以提高变压器的可靠性，还可以减少成本，故可以根据所建模型制定考虑经济性的变压器检修决策，在可靠性满足的情况下使得总成本最低。

5 结束语

针对变压器全寿命周期成本及其成本影响因素之间变化关系，构建了基于全寿命周期成本的系统动力学仿真模型，并计算出总成本以及对 LCC 的影响因素分析。主要结论有：

1) 建立变压器全寿命周期成本模型时考虑到检修对故障率和等效役龄的影响，采用一种新的线性定量衰减的电力变压器役龄回退模型，并综合考虑了大修、小修对 LCC 的影响，从而得到可靠性更好的变压器全寿命周期成本模型。

2) 将系统动力学方法应用于变压器 LCC 模型中能较好地反映系统内各成本要素间的复杂关系，更加直观地反映 LCC 的动态变化。同时通过改变 LCC 成本影响参数，模拟出在不同参数下 LCC 的变化情况和规律，得到关键影响因素为初始投入成本、运行成本、检修成本和停电损失成本。

3) 通过对 LCC 的不确定性因素的分析，得出折现率和负载率对 LCC 有较大的影响，且不同的检修策略对 LCC 也有一定影响。因此在决策时需要折现率、功率因数以及售电电价认真做好市场调研及可行性分析；负载率的影响程度反映为运行成本占 LCC 比重很大且敏感性高，需要通过选择低能耗变压器或现代经营及养护手段，降低运行成本；同时需要

制定好检修决策，保证在可靠性满足的情况下总成本最低，达到最大经济效益^[15]。

参考文献

- [1] Yang Xiao, et al. Fault protection method of single-phase break for distribution network considering the influence of neutral grounding modes[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5 (16): 905-911.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 陈国卫, 金家善, 耿俊豹, 等. 基于系统动力学的寿命周期费用影响因素仿真分析[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38 (12): 1828-1834.
- [5] 李存斌, 庆格夫, 陆冀曙, 等. 基于全生命周期成本的配电网变压器选型系统动力学模型[J]. 现代电力, 2014, 31 (3): 86-90.
- [6] 何先华, 张远鹏, 崔桂兴, 等. 基于回归算法的变压器故障检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (21): 132-139.
- [7] Anon. Landscape design method for a green community based on green building design theory[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2010, 11 (9): 691-700.
- [8] 郑重, 周圆, 王琪, 等. 基于杜鹃算法的变压器全寿命周期成本优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (8): 49-55.
- [9] 杨苏. 基于全寿命周期成本的电力变压器检修决策研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- [10] 谭贵生, 曹生现, 赵波, 等. 基于关联规则与变权重系数的变压器状态综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (1): 88-95.
- [11] 梁锦强, 孙炯, 刘凯. 可修复系统的役龄回退机理及其新模型研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2014, 38 (2): 454-457.
- [12] Skye J., McGee C., Tranchida G., et al. Characterizing Response to a Dynamic Stability Approach to Thumb Carpometacarpal Pain: A Retrospective Study[J]. Journal of Hand Therapy, 2019, 32 (4).
- [13] 孙绍荣, 任思蓉. 房产税制度下买卖行为影响的商品房价格波动系统动力学研究[J]. 计算机应用研究, 2013, 30 (8): 2368-2372.
- [14] Wagner Teixeira França, Murillo Vetrone Barros, Rodrigo Salvador, et al. Integrating life cycle assessment and life cycle cost: a review of environmental-economic studies[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2021.
- [15] 戴卓. 多周期多原料的供应链网络成本优化及其混合遗传算法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31 (9): 2620-2624.

(收稿日期: 2023-10-03)