

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

李存斌¹, 庆格夫^{1,2}, 陆龚曙³, 李 鹏¹

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206; 2. 内蒙古电力集团公司呼和浩特供电局, 内蒙古呼和浩特 010050;
3. 广东电网公司管理科学研究院, 广东广州 510600)

System Dynamics Model of Transformer Selection for Distribution Network Based on Life Cycle Cost

LI Cunbin¹, QING Gefu^{1,2}, LU Gongshu³, LI Peng¹

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China;
2. Inner Mongolia Electric Power Group Company Hohhot Power Supply Bureau, Hohhot 010050, China;
3. Management Science Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China)

摘 要: 针对配电网升级改造过程中的设备选型投资决策问题, 以配电网变压器这一重要设备为研究对象, 充分考虑影响变压器全寿命周期成本的动态变化, 利用系统动力学理论与方法, 构建配电网变压器全寿命周期成本的系统动力学模型, 用以模拟和计算配电网变压器全周期成本, 为配电网设备选型提供参考思路。选取某地区农网改造项目作为案例, 构建变压器全生命周期系统动力学模型并进行仿真, 结果表明运用系统动力学方法来反映变压器的 LCC 变化过程, 不仅可以考虑过程中的影响成本的变化因素 (如电量、故障率等), 而且能够通过模型模拟结果直观地反映出 LCC 及其构成因素的变化过程。

关键词: 配电网; 变压器选型; 全寿命周期; 系统动力学

Abstract: As for the investment decision-making problems of equipment selection in the process of distribution network upgrade, the important power transformer equipment is taken as the research object. Then, by considering the dynamic changes of the whole life cycle cost (LCC) which affected the power transformer equipment, the system dynamics theory and method are used to build the system dynamics model of whole life cycle cost of power transformer equipment. This mode can be used to simulate and calculate full cycle cost of power transformer, and provide a reference for selecting power distribution network equipment. In the end, a case about retrofit projects in an area is given, and the dynamic model of whole life cycle of transformer system is built and simulated. The results show that the system dy-

namics method is used to reflect the transformer LCC change process, which not only can consider the change factors (such as electricity, failure rate, etc.) that affect the cost in the process, but also can reflect the change process of LCC and its component factors can be intuitively reflected through the model simulation results.

Keywords: distribution network; transformer selection; life cycle cost(LCC); system dynamic

0 引 言

在配电网建设投资中, 设备投资所占比重最大, 变压器的投资更是重中之重, 变压器的选型投资决策也因此已成为电力企业投资时极为关注的焦点。20 世纪 80 年代全寿命周期成本 (life cost cycle, LCC) 管理方法被引入国内, 2002 年国家电网公司在上海市泰和变电站 220kV GIS 设备的工程决策中首次全面推行全寿命周期管理, 并取得了预期效果^[1]。除此之外, LCC 管理在主电网规划^[2-3]、配电网规划^[4]、电力工程^[5]、高压电力设备选型^[6]方面都已经被广泛研究。具体到配电网设备选型的 LCC 应用研究: 计及配电网设备运行寿命、设备可靠性能性和电网可靠性的影响, 以成本效益分析原理为基础, 康丽等提出了配电网设备级和系统级 LCC 计算模型^[7]; 罗晓初建立了中低压配电网变压器的全寿命周期成本模型, 并提出以 LCC 最小为原则对配电变压器改造进行选型^[8]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(71271084)

学者们在研究配电网设备的全寿命周期成本时都考虑了资金的时间价值，但是配电网设备的 LCC 构成因素随时间变化而变化的动态过程，如变化的设备年停运时间将导致停电损失成本的变化，却未得到充分考虑。因此，本文将配电网变压器这一主要设备为研究对象，充分考虑影响变压器成本的动态变化，利用系统动力学理论与方法，模拟和计算全生命周期成本，为配电网设备选型提供参考思路。

1 系统动力学理论与方法

系统动力学理论^[9]是一门以定性定量相结合研究系统发展变化的动态行为的应用学科，主要以反馈控制理论、决策过程、系统分析的试验方法、计算机仿真技术等作为理论基础，并以系统思考作为最基本的思考方法，运用系统结构决定系统功能的原理，将系统构成为结构、功能的因果关系图式模型，利用反馈、调节和控制原理进一步设计反映系统行为的反馈回路，最终建立系统动力学模型，并借助计算机对此模型进行模拟实验^[10]。

2 配电网变压器 LCC 的系统分析

以系统的观点来看，配电网变压器的 LCC 是一个完整的、动态变化的系统，该系统的核心是变压器的成本，它由多个因素共同组成。具体而言，配电网变压器的 LCC 主要由投资成本、运行成本、维护检修成本、停电损失及残值(C_D)共 5 部分组成，它们在变压器全生命周期内的不同时间内发生，对 LCC 产生不同的影响，利用系统动力学理论的因果关系图可将配电网变压器的 LCC 表示如图 1 所示。

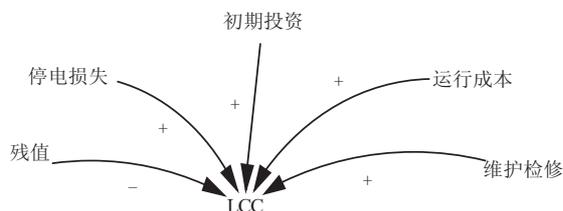


图 1 配电网变压器 LCC 的因果关系图

因果关系图是系统动力学用于分析对象系统内部因素之间相互影响关系的一种有向图，由各因素与因果链组成。一般因果链有两种：如果因果链表示正面的影响那么就称为正链，用带“+”的箭头

表示；反之则称为平衡链，用带“-”的箭头表示^[11]。从图 1 中不难看出，变压器残值对 LCC 的影响是负面的，即残值越大，LCC 越小，其余因素对 LCC 的影响均是正面的。

3 模型的建立

对配电网变压器 LCC 的系统分析确定了其组成因素，进一步确定各因素的成本计算，从而建立相应的系统动力学模型。

① 投资成本(C_I)。投资成本是指购买并建设变压器的所有成本，当且仅当在全寿命周期的初期发生，它主要包括变压器的购买费用、建筑安装工程费用以及其他费用。

② 运行成本(C_O)。运行成本主要是指配电网变压器在投产运营过程中的人工成本和因功率损耗产生的成本。它在变压器建成运行后即刻发生，直到变压器报废回收，具体包括运行人员成本、固定功率损耗成本以及可变功率损耗成本。

运行人员成本是支付给变压器运行工作人员的费用支出，包括培训费用、工资、奖金以及其他一些补贴等。它根据变压器的类型不同而有所不同，对于确定类型的变压器，运行人员成本相对固定，记为 C_P 。

固定功率损耗成本是由与负荷大小无关的空载损耗引起的。记变压器的年停运时间为 T_s ，固定功率损耗为 P_g ，售电电价为 a ，每年固定功率损耗成本为 C_{FC} ，则有

$$C_{FC} = a \times P_g \times (8760T_s) \quad (1)$$

对于确定型号的变压器，在确定的区域范围内，固定功率损耗和售电电价是固定不变的。但是变压器在整个寿命周期内的故障率是变化的，呈“浴盆”状，从而导致每年的停运时间是不确定的。若记变压器的故障率为 x ，变压器故障的修复时间为 T_R ，则计及可靠性的变压器设备每年停运时间可表示为^[12]

$$T_s = 8760 \times \frac{x}{x + 8760/T_R} \quad (2)$$

可变功率损耗成本与负荷大小有关，是由电流通过变压器绕组中的电阻时产生损耗引起的。记可变功率的损耗电量为 E ，每年可变功率损耗成本为 C_{VC} ，则有

$$C_{VC} = a \times E \quad (3)$$

其中可变功率的损耗电量由最大负荷下的有功

功率损耗(记为 $P_{L,max}$)和最大负荷损耗时间(记为 t_{max})共同决定的,即

$$L_c = t_{max} \times P_{L,max} \quad (4)$$

式(4)中的最大负荷下的有功功率损耗与变压器在最大负荷下的有功功率(记为 $P_{A,max}$)、无功功率($P_{R,max}$)、额定电压(U)和等效电阻(R)相关;式(4)中的最大负荷损耗时间可通过功率因数(记为 $\cos\varphi$)和最大负荷利用小时数(记为 T_{max})查询相关手册得到^[13]。求得 $P_{L,max}$ 和 T_{max} 分别为

$$P_{L,max} = \frac{(P_{A,max}^2 + P_{R,max}^2) \times R}{U^2} = \frac{S \times y \times R}{U^2} \quad (5)$$

$$T_{max} = \frac{E}{P_{A,max}} \quad (6)$$

式(5)中 S 、 y 分别表示变压器的额定容量、最大负载率;式(6)中 E 表示变压器每年的输送电量。设备寿命周期的相关研究中,学者们总是将电量假设为固定不变的常量,这与实际情况并不相符。随着经济发展和人民生活水平提高,用电负荷不断增长,在变压器的额定容量内,其输送的电量也会随之增长,直到达到变压器的最大负载率,亦是变压器能够输送的最大输送电量 E_{max} , 可表示为

$$E_{max} = S \times y \times (8\,760 - T_s) \quad (7)$$

③ 维护检修成本(C_M)。维护检修成本是在设备运行周期内对变压器进行检修、保养、维修所产生的人工费用、材料费用以及服务费用等。鉴于目前的电力设备维修体制,将变压器的年维护检修成本视为固定的支出^[8]。

④ 停电损失(C_F)。停电损失是变压器发生故障导致供电中断所带来的损失。部分学者认为这些损失不仅仅包括影响电网企业的售电导致的直接经济损失,还包括停电影响社会效益导致的间接经济损失^[14],但是配电网变压器的停电影响有限。因此,本文所指的停电损失暂时不考虑其间接影响,它可以表示为

$$C_F = a \times S \times \cos\varphi \times y \times T_s \quad (8)$$

⑤ 残值(C_D)。残值是指变压器在其生命周期末报废时能够回收利用的残余价值。一般而言,变压器的残值与变压器的购买费用成正比,生命周期相同的变压器,购买费用越高,其残值越大。

根据以上对变压器全生命周期成本构成的分析,并考虑资金的时间价值(及贴现率为 i),建立基于全生命周期成本的配电网设备选型系统动力学模型如图2所示。

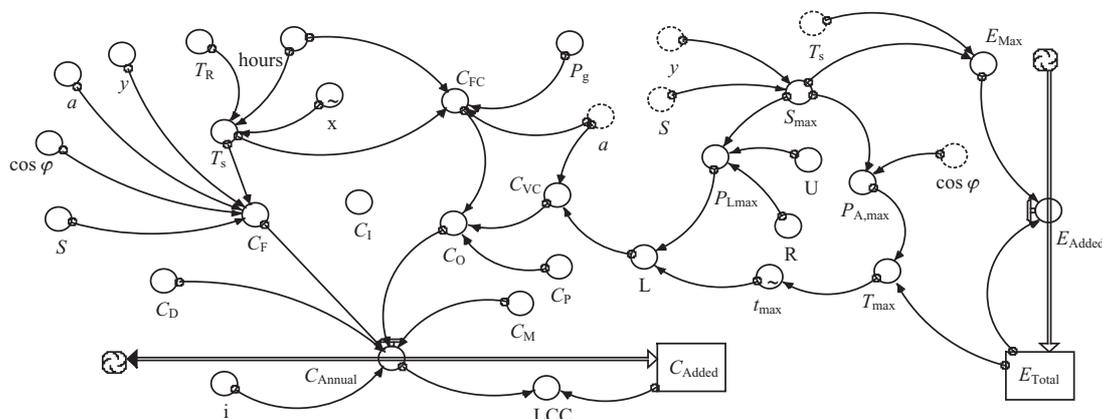


图2 基于全生命周期成本的配电网变压器选型系统动力学模型

模型中各变量表达式与前文一致, C_{Annual} 表示变压器投产运营期间后的每年产生的成本现值,其函数关系为

$$C_{Annual} = (C_F + C_O + C_M - C_D) / (1 + i) T_m \quad (9)$$

式中: T_m 为变压器使用寿命。

用 C_{Added} 表示累计增加的成本,其初值为变压器的投资成本,即 C_1 ;在变压器的寿命周期末,可得到其最终的全寿命周期成本:

$$LCC = C_{Added} + C_{Annual} \quad (10)$$

此外,变量 E_{Added} 表示变压器每年的输送电量增加值, E_{Total} 表示变压器每年的输送电量。

4 模型的模拟

以某地区2012年农网改造项目为例,项目拟安装一台10kV配电网变压器,变压器的选择方案有如下两种:①S11-500/10油浸式配电网变压器,额定容量为500kVA,购买费用为37200元;

②SH15-M 型非晶合金配电变压器，额定容量为 500kVA，购买费用为 58 720 元。结合配电网和变压器的各项参数，确定模型变量初值如表 1 所示。

表 1 配电网变压器选型系统动力学模型变量值

| 变量名称 | 变量取值 | |
|-------------------------------|-----------|--------|
| | 变压器 1 | 变压器 2 |
| 额定容量 S/kVA | 500 | |
| 售电价 a/(0.55 元/kWh) | 0.55 | |
| 贴现率 i | 0.08 | |
| 功率因数 cos φ | 0.95 | |
| 额定电压 U /kV | 10 | |
| 输送电量 E _{Total} /kWh | 3 038 270 | |
| 投资成本 C _I /元 | 63 250 | 96 890 |
| 运行人员成本 C _P /元 | 372 | 118 |
| 固定功率损耗 P _g /kW | 0.6 | 0.2 |
| 等效电阻 R/Ω | 2.06 | 1.72 |
| 维护检修成本 C _M / (元/a) | 150 | 60 |
| 修复时间 T _R /h | 50 | 40 |
| 残值 C _D /元 | 1 860 | 2 936 |

表中输送电量仅仅表示变压器投产运营期初的输送电量，随着配电地区负荷的增加，电量也会随之增长，根据以往电量增加的速度确定，电量同比增长的速度为 5%，则确定变量 E_{Added}的表达式为

$$E_{Added} = \begin{cases} E_{max} - E_{Total} < 0 \text{ then } 0 \\ \text{else } E_{Total} \times 0.05 \end{cases} \quad (11)$$

这表示变压器本身输送的电量是有限的，最大电量 E_{max}的表达式如(7)所示。此外，两台变压器的使用寿命都是 20a，以变压器 1 为例，该变压器在生命周期内呈“浴盆”状的故障率 x 在模型中以图像函数表示，如图 3 所示。

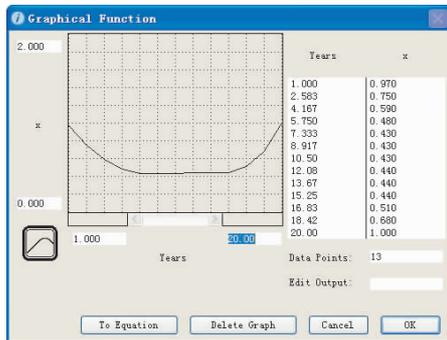


图 3 变量故障率(x)的取值图

模型参数的不同设置表示不同设备的情况。因此，首先在模型中设置变压器 1 的相关参数值，模

型变压器 1 在全寿命周期内的各成本变化情况，其结果如图 4 所示。

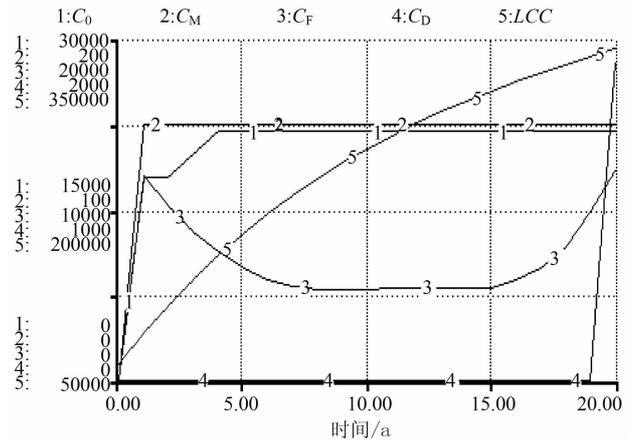


图 4 模拟结果图：变压器 1

图 4 未将投资成本(C_I)列示，因为图标列示的变量有限，而期初发生的投资成本在总的全寿命周期成本 LCC(曲线 5)上能够得到表现：曲线 5 的值在第 0 年(建设期)不为 0，而是等于 63 250，正是变压器 1 的投资额。从图中可以清楚的看到，组成 LCC 的各成本在变压器寿命周期内的变化过程(曲线 1、2、3、4)，以及考虑时间价值的 LCC 的变化情况。其中运行成本 C_O(曲线 1)在第 0 年为 0，第 1 年(运行期)开始产生成本，并受电量增长逐年增长，直到达到变压器能够输送的最大电量；维护检修成本 C_M(曲线 2)在运行期内稳定不变；停电损失 C_F(曲线 3)受到设备故障率的影响，成“浴盆”状波动；残值 C_D(曲线 4)仅仅在期末发生；曲线 5 则表示在寿命周期内，考虑时间价值的变压器 1 的成本随年份的增加，逐年递增，但是增长速度有所放缓，最终确定变压器 1 的 LCC 为 342 662 元。

在模型中设置变压器 2 的相关数据，同样能够得到变压器 2 在全寿命周期内的成本变化情况，将变压器 1 和变压器 2 的 LCC 对比来看，如图 5 所示，图中 LCC(曲线 1)、LCC2(曲线 2)分别表示变压器 1、变压器 2 的全寿命周期成本变化过程。不难看出，变压器 2 的初始投资要高，但是随着设备的投产运行，其成本的增长速度要明显缓慢，在第 5 年左右，与变压器 1 的成本达到相同值，最终 287 400 元的全寿命周期成本要低于变压器 1 的 342 662 元。因此，将选择变压器 2，能够节约成本总额为 55 262 元。

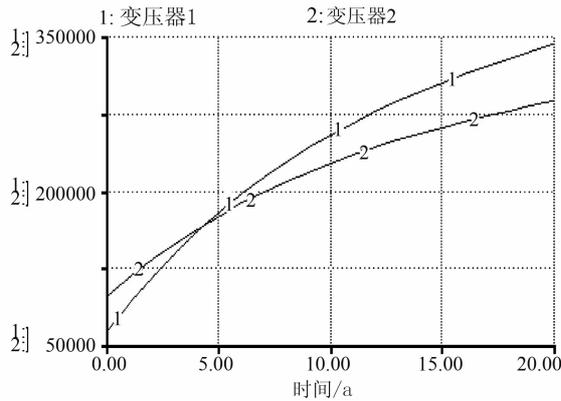


图5 变压器1和变压器2的LCC

5 结论

本文基于全寿命周期成本理论,运用系统动力学方法,首先分析了配电网变压器在其生命周期内的成本构成,构建了能够模拟变压器LCC的系统动力学模型,并结合农网改造项目的变压器选型实例,模拟了不同变压器的LCC变化过程,并提供了能以LCC最小为原则选择变压器的对比结果。

从模型的建立和模拟可以得到如下结论:①从LCC的角度来看,配电网变压器设备选型不能只考虑设备的初始投资,而是需要考虑运行期的成本消耗情况,从而作出更加经济合理的变压器选型决策;②运用系统动力学方法来反映变压器的LCC变化过程,不仅可以考虑过程中的影响成本的变化因素,如电量、故障率等,而且能够通过模型模拟结果直观地反映出LCC及其构成因素的变化过程。此外,模型具有一定的通用性,当运用到其他变压器选型时,只需要改变模型中的参数取值即可;模型同样具有一定的扩展性,当变压器的LCC还包括其他因素时,只需要确定其函数关系,与运行成本、维护检修成本等类同,并列添加模型参数即可。

参 考 文 献

- [1] 马骏,韩天祥,姚明,等. 泰和变电站220 kV GIS设备改造LCC计算后评估研究[J]. 华东电力, 2005, 33(12): 15-19.
- [2] 鲁国起,张焰,祝达康. 全寿命周期成本及其在电网规划中的应用[J]. 现代电力, 2009, 26(6): 77-81.

- [3] 周江昕,管俊,苏卫华,等. 考虑风险决策的全寿命周期成本的电网规划[J]. 华东电力, 2013, 41(4): 768-772.
- [4] 李倩玉,焦石. 全寿命周期成本在配电网规划中的应用[J]. 电工电气, 2013, 4(2): 52-57.
- [5] 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]. 建筑经济, 2009, 33(9): 63-66.
- [6] 李涛,马薇,黄晓蓓. 基于全寿命周期成本理论的变电设备管理[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 50-53.
- [7] 康丽,廖庆龙. 计及可靠性的配电网全寿命周期成本模型及应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 183-186.
- [8] 罗晓初,李乐,魏志连,等. 全寿命周期成本理论在配电变压器改造投资决策中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 207-211.
- [9] Forrester Jay W. Industrial dynamics [M]. USA: Massachusetts Institute of Technology Press, 1961.
- [10] 钟永光,贾晓菁,李旭,等. 系统动力学[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- [11] 李存斌,陆龚曙,李鹏,等. 电网建设项目进度风险管理的系统动力学模型[J]. 华东电力, 2012, 40(2): 178-182.
- [12] 张黎明. 基于全寿命周期成本管理的变电设备维修决策研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2009.
- [13] 陆广香,单渊达,龚乐年,等. 最大负荷损耗小时数求取方法质疑[J]. 电工技术学报, 1996, 11(1): 54-59.
- [14] 吕翔. 基于Morkov过程的电网资产全寿命周期管理的理论研究[D]. 济南:山东大学, 2012.

收稿日期: 2013-09-09

作者简介:

李存斌(1959—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力企业风险管理和信息管理, E-mail: lcb999@263.net;
庆格夫(1972—),男,高级工程师,研究方向为电网设备风险管理, E-mail: 2273641908@qq.com;
陆龚曙(1985—),男,工程师,研究方向为电网项目风险管理, E-mail: ybzs1997@126.com;
李鹏(1985—),男,博士研究生,研究方向为智能电网风险管理与信息管理, E-mail: hdlp0830@163.com.

(责任编辑:杨秋霞)