

变电站改造中变压器全生命周期费用 (LCC) 模型的研究

崔新奇¹, 尹来宾², 范春菊², 邵能灵²

(1.上海市电力公司超高压输变电公司, 上海 200063; 2.上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 对于在变电站改造工程中如何实现对变压器改造进行科学的经济性评价, 一直缺乏系统的理论分析。结合变压器的实际运行情况, 以全生命周期费用 (Life Cycle Cost) 理论为基础, 对变压器运行的全过程费用进行拆分, 提出了变压器的全生命周期费用 (LCC) 模型, 并结合变电站改造中的实际算例, 说明该模型在变压器更新改造的决策分析中的应用。通过两种方案的比较分析, 得出了变压器经济性改造方案, 并进一步对影响变压器 LCC 的主要因素进行分析, 提出降低变压器生命周期费用 (LCC) 的具体建议, 即采用节能型变压器、注重负荷的合理分配以及实行状态检修等。

关键词: 全生命周期费用 (LCC); 变电站改造; 变压器; 经济性; 模型

Study of LCC for power transformer in modification of transformer substation

CUI Xin-qi¹, YIN Lai-bin², FAN Chun-ju², TAI Neng-ling²

(1. Shanghai Extra High Voltage Transmission and Transformation Company, Shanghai 200063, China;
2. Electrical Engineering Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The theory about how to achieve scientifically economical evaluation of transformer during the project of substation reconstruction has always been lack of systematic analysis. Concerning about transformers practical condition, this paper divides the whole cost in transformer's operation and presents life cycle cost (LCC) model whose applications in modification are illustrated by several numerical examples in substation's reconstruction. By comparing and analyzing two schemes in substation's modification, it obtains the economical scheme. Further more, major factors affecting the LCC of transformer are analyzed in order to put forward specific suggestions of reducing the LCC of transformers. Such suggestions include using energy-saving transformer, emphasis on rational allocation of load, implementation of condition-based maintenance and so forth.

Key words: life cycle cost (LCC); modification of substation; transformer; economical; model

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0069-05

0 引言

变压器是变电站的重要设备, 其安全运行是电力系统安全供电的重要保障。目前, 大家习惯于重视变压器的购置费用而忽略变压器的运行费用, 由于一般变压器在有效寿命期 30 年内的运行成本要高达制造成本的 6~7 倍^[1-5], 因此变压器全生命周期成本计算显得十分必要。

一般来说变压器的全生命周期成本分析有以下优点: (1) 有助于决策者客观地对所选变压器进行评估, 并以全寿命成本而不是最初的购置成本作为标准进行经济性选择; (2) 有助于找出各成本要素的相对比例和提高资金利用率的方法; (3) 有助于对变压器的使用、运行和维护等方面的不同方案进行经济性评估。本文通过对变压器的运行和维护费

用的具体分析, 并根据 IEC60300-3-3 标准, 提出了变电站改造中的变压器的全生命周期费用 (LCC) 模型, 并通过实例分析, 提出了降低变压器 LCC 的几点建议。

1 全生命周期成本分析原理介绍

1.1 全生命周期成本的定义

根据 IEC60300-3-3 (国际电工委员会制定的全生命周期成本计算的标准) 的规定^[3], 设备的生命周期可以分为产品的设计与开发、制造、安装、运行、维护以及废弃, 因此, 设备的全生命周期成本可以定义为上述各阶段相关成本的总和。设备全生命周期成本 (Life Cycle Cost, LCC) 是指整个生命周期内所消耗的总成本, 包括购置成本 (Acquisition Cost), 拥有成本 (Owership Cost) 和废弃成本

(Disposal Cost)。

$$LCC = C_{aq} + C_{ow} + C_{di} \quad (1)$$

其中： LCC 是全寿命周期成本； C_{aq} 是设备的购置成本； C_{ow} 是设备的拥有成本（运行和维护成本）； C_{di} 是设备的废弃成本，包括报废成本和残值。

设备的全寿命周期成本中，购置成本所占的比例随时间下降，拥有成本所占的比例随时间上升，而且在很多情况下，购买设备的成本低于全寿命周期的拥有成本，通常设备的废弃成本很小（但是变压器的废弃成本较大），因此在考虑设备的投资时，应该考虑设备的整个寿命周期的费用，而不是只考虑其初始价格。

1.2 全寿命周期成本分析的步骤

根据对 LCC 相关研究及应用的归纳，虽然针对不同的系统 LCC 分析的程序有所不同，然而，一些必不可少的分析过程却是相似的，可以归纳为下面的六个基本过程如图 1 所示^[1]。

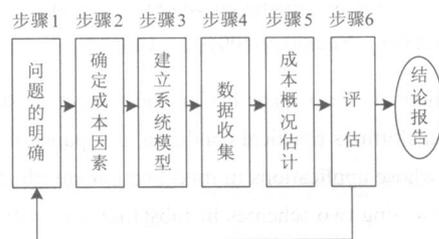


图 1 LCC 分析的六个基本步骤

Fig. 1 The basic LCC process in six steps

一般来说，进行 LCC 成本分析的首要步骤是明确要解决的问题。LCC 模型的建立很大程度上取决于模型所覆盖的范围和需要实现的具体功能，因此应首先确定运行的设备及其维护的策略。成本要素是 LCC 模型的重要组成部分。应当有系统的予以确定，从而防止一些重要的成本因素被忽略，而建立成本模型的分解结构可以很好地解决这一问题。一般可以把产品寿命的不同时期的花费作为成本模型的分解结构。确定成本因素之后，还要把它们之间的相互关系在系统的模型中适当地体现出来，例如应适当地考虑到分析的可靠性、实用性和可维护性等。由于数据的准确性直接决定了 LCC 分析结果的可靠性，本文对 LCC 分析所要使用的数据，通过调查问卷、成本报告、历史数据记录以及相关合同中获得。此外对部分数据则是根据经验和相关的参数分析进行估计。

在制定合理的长期财政计划时，全寿命周期成本概况是非常关键的信息。要实现全寿命周期成本概况的准确估计，必须要考虑通货膨胀率、利息率、

汇率和税率的影响。在评估阶段，灵敏性分析可以确定成本因素对 LCC 的影响程度，从而为进一步提出 LCC 的优化方案打下基础。

2 变压器的全寿命周期模型的建立

根据 IEC60300-3-3 标准，对 LCC 模型的主要构成要素进行具体的分析，建立变压器的 LCC 模型，并给出计算的表达式。

变压器的全寿命周期成本模型可定义为四大成本之和，即 IEC 标准中的购置成本、运行成本、维护成本以及处置成本。由于购置成本明显易得，因此变压器 LCC 的分析计算主要集中在变压器的运行和维护成本的评估上。变压器的 LCC 模型的定义如方程式 (2) 所示：

$$LCC_{\text{变压器}} = C_{iv} + C_{oc} + C_{mc} + C_{dc} \quad (2)$$

其中： C_{iv} 指变压器的购置成本（investment costs），包括变压器及其维修设备的购置成本、员工培训费用和记录成本； C_{oc} 指变压器的运行成本（operation costs），包括变压器的试验、安装、损耗、停运成本、人工费用等； C_{mc} 指变压器的维护成本（maintenance cost），包括故障前的检修成本和故障后的维修成本； C_{dc} 指变压器的处置成本（disposal cost），包括变压器的报废成本和残值。

2.1 变压器的购置成本

变压器的购置成本可定义如下：

$$C_{iv} = C_{tp} + C_{ep} + C_{td} \quad (3)$$

式中： C_{tp} 指变压器的购置成本（transformer purchase cost）； C_{ep} 指变压器维修设备的购置成本（transform purchase cost）； C_{td} （training and documenting cost）指员工的培训成本和记录成本。

2.2 变压器的运行成本^[5]

变压器的运行成本可定义如下：

$$C_{oc} = C_{exc} + C_{enc} + C_{inc} + C_{fc} + C_{moc} \quad (4)$$

式中： C_{exc} 指变压器的试验费用（experimentation cost），变压器在投入运行前应进行一些必要的试验，以完成设备技术标准的测试，如短路承受能力试验、温升试验和局部放电试验等，以及于此相关的额外试验费用； C_{enc} 指变压器运行的能源损耗成本（energy loss cost），变压器是输变电设备中的能源消耗大户，其在运行状态下，始终在消耗着电能，据估计，我国变压器的总耗损占系统总发电量的 3%~5%，造成了巨大的电力浪费； C_{inc} 指变压器的安装费用（installation cost），包括安装时花费的运输、人工和调试的总费用； C_{fc} 指变压器的停运损失

成本 (failure cost), 在规定的寿命周期内, 因发生故障而停运以及效率下降所造成的损失; C_{moc} 指人工费及其他成本 (man and other cost), 在变压器的寿命周期内, 负责运行或管理的人员的工资, 以及与变压器运行有关的、不包括在上述费用的一切费用。

2.3 变压器的维护成本

变压器的维护成本主要由两方面构成, 即故障前设备检修成本和故障后设备维修成本。

2.3.1 检修成本 (preventive cost)

变压器故障前的检修成本 C_{pc} 主要包括以下几个方面:

(1) 有计划的定期检修成本。变压器的维护应制定相关的检修计划, 以保持变压器的品质 (如变压器损耗、噪音等), 延长变压器的运行寿命。

(2) 故障的预防性试验成本。变压器的故障类型有很多种且随时都有可能发生。通过预防性试验可以及时发现隐患, 并对不同故障提出针对性的维修方案, 从而提高故障维修时的有效性。

(3) 备用部件的购置和保养成本。变压器故障的维修有时会进行部件的替换, 这些备用部件的购置、存储和保养成本不容忽略。

(4) 附加费用。主要包括与故障前检修有关的人工费、设备使用费以及外部运行环境改善费用等。

2.3.2 维修成本

变压器的维修成本 C_{cc} 是指变压器故障时, 排除故障所需的检测成本、设备使用成本、人工成本等相关费用。

2.4 变压器的处置成本

变压器的处置成本主要包括报废成本和设备的残值。报废成本是指变压器退役后的拆除和运输费用; 残值是指变压器报废后的可回收费用, 由于变压器是材料密集型产品, 其价值主要取决于硅钢片, 铜材和变压器油等消耗主材, 因此变压器报废后的残值很高, 一般是现值的 30%~40%^[5]。因此可定义处置成本的表达式为:

$$C_{dc} = C_{baofei} - C_{canzhi} \quad (5)$$

其中: C_{dc} 指处置成本; C_{baofei} 指报废成本; C_{canzhi} 指变压器的残值。

3 变压器 LCC 模型在变电站改造中的应用分析

随着我国国民经济与电力新技术的高速发展, 一些老变电站面临容量不足、设备老化、技术落后等问题, 已不能满足区域的电力需求, 迫切需要进

行更新改造。变电站的改造主要包括: 变电站容量的提升、老旧设备的更新改造以及新型保护回路和控制系统的建立或改造。变电站改造不仅一次性投入大, 资金回收期长, 而且日常的运行维护成本也相当高。因此, 如何降低变电站改造在全寿命周期内的成本, 如何对不同改造方案进行经济性评价是当前迫切需要解决的问题。

变压器更新改造是变电站改造的重要部分, 直接关系到变电站改造后电力供应的可靠性以及改造的经济性评价。因此变电站改造过程中, 对变压器的更新改造的研究具有重要的现实意义。据资料统计, 在国内电网使用的变压器中, 役龄接近使用年限的变压器占有相当比例。对这些老旧变压器, 特别是已经出现非正常老化或出现内部故障的变压器的更新改造, 是电力企业重点关注的大事。但是在我国普遍存在资金短缺以及耗能设备更新观念未深化的实际情况, 更新改造变压器还存在新购一台损耗低、但一次性投入大的变压器和修理改造一台损耗大, 但一次性投入较少的两难选择^[9]。

利用变压器LCC模型可以实现变压器更新和改造费用的量化, 有助于对两种方案进行有效的经济性评价。通过变压器LCC计算结果的灵敏性, 可以找出影响变压器LCC大小的主要成本因素, 有利于对更新或改造方案进行优化, 进一步控制总成本, 从而实现成本的最优化。

通过对变压器LCC模型的研究与分析, 可以为其他重要电力设备的经济性改造提供经验, 也可以把这种方法推广到整个变电站改造的经济性评估, 实现资源的最优配置。

3.1 变压器LCC的计算

下面利用以上的定义对某220 kV改造变电站中的某变压器进行LCC的相关研究, 该变压器已运行15年, 额定容量为300 MVA, 出现绝缘轻微老化, 而且容量已不能满足当地经济发展的需要, 要进行改造, 现提出两种方案: 一种方案是购置一台新变压器进行替换; 另外一种方案是对原有变压器进行技术改造。

3.1.1 方案详细说明

方案一: 购置一台新变压器进行替换, 更新后变压器的额定容量为300 MVA, 空载损耗 $p_0=200$ kW, 负载损耗 $p_k=750$ kW, 最大负荷率 $\beta=80\%$, 最大负荷利用小时数 $T_{max}=6500$ h。

方案二: 对原有变压器进行技术改造, 更换变压器绕组、绝缘材料, 增加冷却器若干, 改造后变压器容量为300 MVA, 空载损耗 $p_0=300$ kW, 负载损耗 $p_k=900$ kW, 最大负荷率 $\beta=80\%$, 最大负荷利用小时数 $T_{max}=6500$ h。

3.1.2 变压器的损耗成本 C_{enc}

方案一：取经验系数 $K=0.3$ ^[4]，得到年负荷损耗率 $\eta = K(\frac{T_{max}}{8760}) + (1-K)(\frac{T_{max}}{8760})^2 = 0.608$ ，此变压器的年损耗电量：

$$\Delta W = (p_0 + \beta^2 p_k) \times \eta \times 8760 = 3621734 \text{ kWh}$$

设电费为0.5元/kWh，则变压器一年的损耗约为181万元，即 $C_{enc1}=181$ 万元/年。

方案二：根据上面的计算式，代入数据可得， $\eta=0.608$ ， $\Delta W=4665646$ kWh，变压器年损耗费用约

为233万元，即 $C_{enc2}=233$ 万元/年。

3.1.3 变压器的残值 C_{canzhi}

根据经验，变压器的残值为变压器退役时现值的30%~40%，为方便两方案的比较，统一取30%，变压器的年折旧率为 $\alpha=10\%$ ，以20年为限，计算得：

$$C_{canzhi1} = 30\%C_{ip1}(1+\alpha)^{20} = 98 \text{ 万元}$$

$$C_{canzhi2} = 30\%C_{iv2}(1+\alpha)^{20} = 59 \text{ 万元}$$

3.1.4 总费用比较

其余的一些费用，根据运行经验，列出费用表如表1所示。

表1 变压器LCC的相关费用

Tab.1 The related costs of transformer's LCC

	C_{iv} 购置成本			C_{oc} 运行成本					C_{mc} 维护成本		C_{dc} 处置成本	
	C_{ip}	C_{ep}	C_{td}	C_{exc}	C_{enc}	C_{inc}	C_{fc}	C_{moc}	C_{pc}	C_{cc}	C_{baofei}	C_{canzhi}
方案一	1500 w	20 w	3 w/y	10 w	181 w/y	10 w	5 w/y	8 w/y	8 w/y	2 w/y	15 w	-98 w
方案二	1000 w			8 w	233 w/y	5 w	10 w/y	10 w/y	10 w/y	2 w/y	15 w	-59 w

备注：w：万元；w/y：万元/年，假设电价为0.5元/kWh。

3.1.5 两种方案的LCC比较

为了便于两方案的比较，只计算变压器未来20年的寿命周期费用，根据式(2)~式(5)，代入数据计算，LCC计算结果见表2。

表2 变压器LCC计算结果

Tab.2 The calculation of transformer's LCC

	C_{iv}	C_{oc}	C_{mc}	C_{dc}	LCC
方案一	1580	3900	200	-83	5597
方案二	1000	5073	240	-44	6269

从表2的计算结果可知，短期效益看，更新一台变压器比改造旧变压器一次投入要多580万元左右，但以变压器运行寿命20年的总成本比较，更新变压器的方案比改造变压器的方案的LCC要低600多万元，因此更新方案具有较好的经济性。而且新购变压器结构新，技术成熟，安全可靠，能够有效地提高供电的可靠性和设备的可维护性，故优先选择方案一。

3.2 影响变压器LCC的主要因素分析

对于LCC分析来说，分析的重点是显著影响LCC的因素。影响某个方案LCC大小的不外乎是一次性投入费用、使用年限、使用费用、维修费用等因素，而在这些因素中，总有一些因素的变化会对LCC产生较大的影响^[8]。

变压器的LCC分析也不例外，分析的重点就是找出显著影响变压器LCC的成本因素，只有这样才能通过对它们的合理控制，实现降低LCC的目的，以获取较好的经济效益。

3.2.1 购置成本的效益分析

从计算结果中可得，两个方案的购置成本在各自LCC中的比例分别为： $a_1 = C_{iv}/LCC_1 = 28.2\%$ ， $a_2 = C_{iv}/LCC_2 = 16.0\%$ ，所占比例较小，因此它们的改变不会直接影响到两方案间的经济性选择的结果。

3.2.2 运行成本的效益分析

根据表2计算结果可得，两方案的运行成本在各自LCC的比例分别为： $b_1 = C_{oc}/LCC_1 = 70.0\%$ 及 $b_2 = C_{oc}/LCC_2 = 80.9\%$ ，都远超过50%，因此运行成本的改变对LCC的大小影响程度很大，进而决定了方案的经济性选择。进一步对运行成本的构成要素分析，可以发现两种方案的变压器20年运行周期的损耗费用分别为：

$$\sum C_{enc1} = C_{enc1} \times 20 = 3620 \text{ 万元}$$

$$\sum C_{enc2} = C_{enc2} \times 20 = 4660 \text{ 万元}$$

即运行成本的绝大部分是变压器的损耗费用。因此，也可以说变压器运行周期内的损耗费用直接决定了运行成本，是对变压器LCC具有最大影响的成本因素。

3.2.3 维护成本的效益分析

由于维护成本在变压器的 LCC 中的比例都小于 5%，因此，维护成本的改变一般不会直接影响到不同方案间的选择。从上面的效益分析可知，变压器 LCC 的大小主要取决于一次性投入成本和运行成本的多少，其中运行成本中的损耗成本对 LCC 的影响最大，降低变压器的运行损耗可以大大减少运行成本。因此对一次投入成本和运行成本进行合理优化，尽量降低变压器的电力损耗是实现变压器 LCC 优化的关键。

4 结论

全寿命周期成本分析不仅可以应用到变压器的更新改造，而且在变电站更新改造也可以作为经济性分析的重要方法，是今后对不同方案进行经济性评估的发展趋势。

本文介绍了变压器的 LCC 模型，通过实例计算及影响因素的分析找出影响变压器 LCC 大小的主要因素，根据以上分析得出减少变电站改造中变压器费用(LCC)的方法有：

(1) 应选择高质量的节能型变压器，尽管其一次投资较大，但通过效益比较分析可知，高质量的节能变压器可以较大幅度地降低变压器的耗损成本，能够实现采用更新变压器方案的 LCC 最少。

(2) 在变压器的运行过程中，合理使用变压器，通过合适的负荷分配、冷却方式等措施，降低能源损耗，从而控制变压器的运行费用并且延长使用寿命。

(3) 以状态检修代替常规的计划检修。状态检修能够实现高效率的设备维护管理，可以在提高供电的可靠性和保证设备安全运行的前提下，减少设备的维护和其他相关费用。

参考文献

- [1] Kawauchi Y, Rausand M. Life Cycle Cost Analysis in Oil and Chemical Process Industries[EB/OL]. <http://www.ntnu.no/ross/reports/lcc.pdf>, 1999.
- [2] Jun H K, Kim J H. Life Cycle Cost Modeling for Railway Vehicle[J]. IEE, 2007.

- [3] International Electrotechnical Commission, Life Cycle Costing[Z]. International Standard 60300-3-3, 2004.
- [4] 弗兰克林 A C, 弗兰克林 D P. 变压器全书[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
Franklin A C, Franklin D P. The J.& P. Transformer Book [M]. Beijing: China Machine Press, 1990.
- [5] 姜益民. 变压器的全寿命周期成本分析[J]. 上海电力, 2004(3): 188-191.
JIANG Yi-min. Analysis of Life Cycle Cost of Transformer[J]. Shanghai Electric Power, 2004(3): 188-191.
- [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 (12): 50-53.
LI Tao, MA Wei, HUANG Xiao-bei. Power Transformation Equipment Management Based on Life Cycle Cost Theory [J]. Power System Technology, 2008, 32 (12): 50-53.
- [7] 郭基伟, 谢敬东, 唐国庆. 电力设备管理中的寿命周期费用分析[J]. 高电压技术, 2003, 29 (4): 13-15.
GUO Ji-wei, XIE Jing-dong, TANG Guo-qing. Life Cycle Cost Analysis in Electrical Equipment Management [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (4): 13-15.
- [8] 张俊. 基于全寿命周期成本(LCC)的变电站建设的决策分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
ZHANG Jun. Decision-making Analyse of Electric Substation's Construction Based on Life Cycle Costs[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.

收稿日期: 2009-04-23; 修回日期: 2009-06-17

作者简介:

崔新奇(1974-), 男, 高级工程师, 从事变电站的运行与管理工作;

尹来宾(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及综合自动化; E-mail: yinlaibin@yahoo.cn

范春菊(1967-), 女, 副教授, 博士, 长期从事人工智能在继电保护及综合自动化中应用的研究及教学工作。