

Full Life Cycle Model of Distribution Transformer Based on Time Value of Funds

Ran Hu¹, Xifa Wu²

¹Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²Shenzhen Xinneng Electric Power Development and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Email: 83025152@qq.com, 77269509@qq.com

Received: May 31st, 2019; accepted: Jun. 18th, 2019; published: Jun. 25th, 2019

Abstract

Because the components of the full life cycle of distribution equipment are dynamic processes, a set of life cycle models for distribution transformers are established to provide a reference for equipment selection in the process of distribution network planning or transformation. Firstly, the main influencing factors of the full life cycle cost of the distribution transformer are fully considered, and the transformer investment phase, operation phase, operation and maintenance phase, failure phase and decommissioning phase are respectively modeled. Then, using the capital time value method, the capital time value model of the transformer life cycle cost is constructed to calculate the full cycle cost of the distribution network transformer throughout the operating period. Finally, the Shenzhen Longgang Bureau distribution network planning project is used as a case deduction. The validity and practicability of the established model are proved by comparing the full life cycle cost of two different types of transformers, and the cost fluctuations of different stages of the distribution transformer are visually reflected by the model simulation results.

Keywords

Distributed Network Transformer, Full Life Cycle Cost, Time Value of Funds, Equipment Selection

基于资金时间价值的配电变压器全生命周期模型

胡 冉¹, 吴夕发²

¹深圳供电局有限公司, 广东 深圳

²深圳新能电力开发设计院有限公司, 广东 深圳

Email: 83025152@qq.com, 77269509@qq.com

收稿日期: 2019年5月31日; 录用日期: 2019年6月18日; 发布日期: 2019年6月25日

摘要

由于配电设备的全生命周期构成因素是随时间不断变化的动态过程, 因此针对配电网规划或改造过程中的设备选型问题, 本文以配电变压器为研究对象, 建立一套全生命周期模型, 为配电网设备选型提供参考依据。首先充分考虑配电变压器全寿命周期成本的主要影响因素, 对变压器投资阶段、运行阶段、运行维护阶段、故障阶段以及退役阶段分别进行建模; 然后利用资金时间价值方法, 构建变压器全寿命周期成本的资金时间价值模型, 用以计算配电网变压器整个运行年限内的全周期成本; 最后以深圳龙岗局配电网规划项目作为案例推演, 通过比较两款不同型号变压器的全生命周期成本来证明所建立模型的有效性和实用性, 并且通过模型模拟结果直观反映配电变压器不同阶段的成本波动情况。

关键词

配电网变压器, 全生命周期成本, 资金时间价值, 设备选型

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在配电网规划或改造过程中, 设备投资问题逐渐成为电力人员关注的焦点, 其中变压器的投资问题更显突出, 变压器的选型投资决策也因此成为电力企业投资时极为关注的焦点。通过多年的电网建设、城市、农网改造、电网经济运行水平提高等方面的工作, 粗犷性的投资已不适应“精益化”的管理要求, 投资综合效益最大化是未来的趋向, 如何将投资和降低综合损耗实现最优化是目前需要思考和研究的问题[1] [2] [3]。通过目前配电网的发展方向, 可知在配电网网架上取得最大效益的空间已不大, 而配电变压器的选型是提高投资综合效益的有效手段, 因此有必要对低压配电设备具体情况进行分析, 以台区经济运行为基础, 找出最适合当地的配电变压器, 并探索出一套模型, 使配变设备选型标准化、易于推广应用, 实现投资综合效益最大化。

20世纪90年代初, 我国电力企业开始对资产全寿命周期成本(life cost cycle, LCC)管理方法进行研究, 2002年国家电网部分供电公司在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。除此之外, LCC管理在主电网规划、配电网规划、电力工程、高压电力设备选型方面都已经被广泛研究和应用[4]。

针对LCC管理在配电网规划和改造中具体配电设备选型的应用, 国内学者已经进行了大量的研究和探索。文献[5] [6]建立了考虑资金时间价值的电力变压器全寿命周期成本计算模型, 并采用灵敏度分析方法对配电变压器的影响因素进行灵敏度分析。文献[7]对配电装置运行的全过程费用进行拆分, 提出了配电装置的全寿命周期费用模型, 并结合变电站改造的实际算例, 通过对两种方案的比较分析, 得出了变电站配电装置改造的经济性方案。文献[8]基于全寿命周期成本(LCC)理论建立了海上升压站主变压器的成本分析模型, 通过对模型中各组成部分进行分解计算和对重要影响因素的灵敏度分析得出最优冗余配置方案。

由以上分析可知, 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, 但是部分配电网设备的LCC构成因素是随时间变化而变化的, 例如变化的设备在确定的运行年限内的故障率或

设备的故障修复时间等因素在 LCC 计算过程中都非一成不变的。因此, 本文将以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, 基于资金时间价值方法, 模拟并计算全生命周期成本, 为配电网设备选型提供参考依据。

2. 全生命周期成本构成

电力工程规划和建设项目全生命周期成本是指在项目策划、立项、设计、建设实施、运行维护、报废等各阶段所产生的费, 主要包括项目前期费用、设计费、施工费、监理费、运行费、日常维修、大修、停电故障成本、报废等费用。不同阶段生命周期成本的构成情况如图 1 所示。

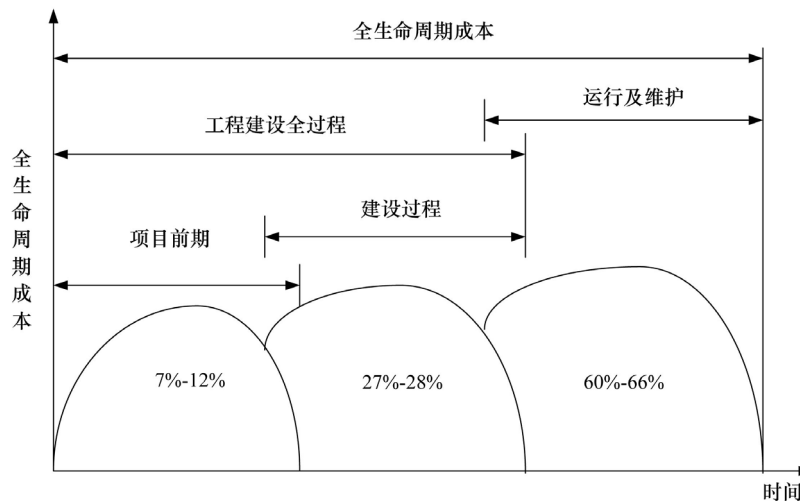


Figure 1. Full life cycle composition
图 1. 全生命周期构成情况

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。同大多数配电设备 LCC 模型相似, 配电网变压器的 LCC 也是由投资成本、运行成本、检修维护成本、停电故障成本及退役处置成本共 5 部分组成[9], 如式(1)所示。

$$LCC_{\text{变压器}} = C_I + C_O + C_M + C_F + C_D \quad (1)$$

式中: C_I 为变压器初始投资成本; C_O 为变压器运行成本; C_M 为变压器检修成本; C_F 为变压器故障成本; C_D 为变压器退役处置成本。它们在变压器全生命周期内的不同时间阶段内发生, 并对总体 LCC 产生不同的影响。

3. 配电网变压器 LCC 模型

对配电网变压器 LCC 的系统分析确定了其每阶段的组成部分, 结合配电网规划标准在各相应阶段的具体设备选型规定, 进一步分析并确定各阶段成本计算时所涉及到的影响因素, 从而建立相应的变压器 LCC 模型。合理地制定出配电变压器在全寿命周期内的设备选型策略, 为电力决策者做出合理的选择提供科学的依据, 进而提高电力企业的经济效益。

3.1. 变压器投资成本

变压器投资成本(C_I)是指购买并建设变压器的所需成本, 当且仅指在全寿命周期的初期阶段的花费成本, 它主要包括变压器的购买费用、建筑安装工程费用以及培训等其他费用。

$$C_I = C_{gm} + C_{az} + C_{qt} \quad (2)$$

式中: C_{gm} 为设备购买费用, 其与设备选型标准中的变压器安装容量和规模呈一定比例; C_{az} 为安装调试费用, 其与 C_{gm} 呈正比例关系, 由经验数据分析, 假设 $C_{az} = 7\%C_{gm}$ 。 C_{qt} 为其他费用一些费用的统称, 由于该项费用标准存在一定的不确定性, 为了简化处理假设其与 C_{gm} 也呈正比例关系, 假设 $C_{qt} = \lambda C_{gm}$ (λ 由具体电力部门数据统计分析后得到)。

3.2. 变压器运行成本

运行成本(C_O)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。

$$C_O = C_p + C_{pc} + C_{vc} \quad (3)$$

运行人员成本是指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差异, 对于确定类型的变压器, 运行人员成本相对固定, 记为 C_p , 该项指标由电力人资部门统计后得到。

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_{PC} , 则有:

$$C_{PC} = a \times P_g \times (8760T_s) \quad (4)$$

由相应设备选型规划标准可知, 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。若变压器的故障率记为 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:

$$T_s = 8760 \times \frac{x}{x + 8760/T_R} \quad (5)$$

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_e , 每年可变功率损耗成本为 C_{VC} , 则有:

$$C_{VC} = a \times E_e \quad (6)$$

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:

$$E_e = P_{L,max} \times t_{max} \quad (7)$$

式(7)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(7)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。求得和分别为:

$$P_{L,max} = \frac{(P_{A,max}^2 + P_{R,max}^2) \times R}{U^2} = \frac{S \times y \times R}{U^2} \quad (8)$$

$$T_{max} = \frac{E}{P_{A,max}} \quad (9)$$

式(8)中 S 、 y 分别表示变压器的额定容量、最大负载率; 式(9)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:

$$E_{\max} = S \times y \times (8760 - T_s) \quad (10)$$

综上所述变压器的运行成本可表示为:

$$C_o = C_p + a \cdot P_g \cdot (8760)^2 \cdot \frac{x}{x + 8760/T_R} + a \cdot t_{\max} \cdot \frac{S \times y \times R}{U^2} \quad (11)$$

3.3. 变压器检修维护成本

根据分析变压器设备检修维护所产生的费用, 定义其由检修计划失负荷成本、随机失负荷成本以及检修费用组成。设备停运检修时, 当系统备用容量不足或负荷转移路径受限, 会导致电网直接失去部分负荷, 且该过程还可能伴有开关操作费用, 此部分称为检修计划失负荷成本; 设备检修停运还会使负荷点的年平均停运时间增加, 导致系统电量不足期望值增加, 称为随机失负荷成本; 检修费用通常为设备大修或者小修所花的费用。从而, 设备检修成本可表示为:

$$C_M = C_{m1} + C_{m2} + C_{m3} \quad (12)$$

式中 C_{m1} 为电网的检修计划失负荷成本; C_{m2} 电网的随机失负荷成本; C_{m3} 为设备检修费用。

其中:

$$C_{m1} = P_{m1} \times T_c \times a + A \times \gamma \quad (13)$$

P_{m1} 是由检修造成的单位时间计划失负荷量; T_c 为负荷停电持续时间, 具体为检修恢复时间、备用电源投入时间或倒闸操作时间等; A 为检修过程中开关操作的个数; γ 为开关操作费用; a 为计划失负荷单位电价。

$$C_{m2} = \sum_{i=1}^K a_2 L_i T_i \quad (14)$$

L_i 为负荷点 i 处的平均负荷; T_i 为考虑检修设备集合时负荷点 i 处的年平均停运时间; K 为需检修的负荷点个数; a_2 为随机失负荷单位电价。

其中:

$$T_i = \sum_j^N (\lambda'_j r'_j + \lambda_j r_j) \quad (15)$$

N 为负荷点到电源点的最小路上的设备个数; λ'_j 为设备 j 的检修停运率; r'_j 为设备 j 的平均检修持续时间; λ_j 为设备 j 的故障停运率; r_j 为设备 j 的平均故障修复时间。

B 为检修设备的集合; C_{fi} 是设备 f 选择检修方式 i 对应的检修费用(该指标根据相对应的设备检修标准得到)。

综上所述, 变压器设备检修维护成本为:

$$C_M = (P_{m1} \times T_c \times a + A \times \gamma) + \left(\sum_{i=1}^K a_2 L_i \left[\sum_j^N (\lambda'_j r'_j + \lambda_j r_j) \right] \right) + \sum_{f \in B} C_{f,i} \quad (16)$$

3.4. 变压器故障损失成本

变压器故障损失是指变压器发生故障导致供电中断所带来的损失。设备故障损失成本由电网运行成本以及个体成本组成。设备发生故障导致电网失负荷带来的停电成本称为电网运行成本; 设备发生故障后能修复设备的修复费用或者无法修复的设备根据同种设备更换的费用称为个体成本。

因此变压器故障损失成本可表示为:

$$C_F = \sum_{S \in \psi} [C_{f1,s} + C_{f2,s}] \quad (17)$$

式中: ψ 为检修周期里待修设备集合; $C_{f1,s}$ 为由设备 s 发生故障引起的电网运行成本(根据历史同类型变压器故障后的大数据统计分析后得到); $C_{f2,s}$ 为由设备 s 发生故障造成的个体成本(根据各规划标准规定的设备选型更换情况确定)。

其中:

$$C_{f1,s} = P_{f1,s} \times T_C \times a_2 \quad (18)$$

式中: $P_{f1,s}$ 为由设备 s 发生故障引起的单位时间失负荷大小; T_C 为负荷停电持续时间, 具体包括故障恢复时间、备用电源投入时间以及倒闸操作时间等; a_2 为随机失负荷单位电价。

$$C_{f2,s} = \eta_S C_{m,s} + [1 - \eta_S] C_{r,s} \quad (19)$$

式中: η_S 为设备 s 故障的修复概率; $C_{m,s}$ 为设备 s 发生故障的修复费用; $C_{r,s}$ 为设备 s 根据同种设备更换的费用。

综上所述, 变压器故障损失成本可表示为:

$$C_F = \sum_{S \in \psi} [(P_{f1,s} \times T_S \times a_2) + (\eta_S C_{m,s} + [1 - \eta_S] C_{r,s})] \quad (20)$$

3.5. 变压器退役处置成本

变压器设备退役处置成本由报废成本以及设备残值组成。报废成本为设备退役时产生的一系列费用, 通常为了简化处理, 将其视为安装调试费用的正比关系, 设备残值是设备报废之后的可回收费用, 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。

$$C_D = C_{bf} - C_{cz} \quad (21)$$

式中: C_{bf} 为设备报废成本, $C_{bf} = \alpha C_{az}$ (经过数据统计分析后设定), C_{cz} 为设备残值, $C_{cz} = \beta C_{gm}$ (由具体电力部门数据统计分析后得到)。

4. 基于资金时间价值的变压器 LCC 模型

资金的经济效益, 除了受资金多少的影响, 还受资金产生时间点的影响, 当前的资金比将来同样数量的资金更有价值, 不同时刻投入资金以及对应效益具有不同的价值, 从而当前所持资金较将来对应的相等资金而言会有更高的价值[10]。

实际工程的经济分析里, 资金的时间价值一般有如下几种表示方法: 现值 P , 表示未来某个时刻上的资金折算至当前对应的价值, 它体现了现金流量图上起始点的投资数额; 终值 F , 指现在的资金折算到未来某个时刻对应的价值, 它的概念是在一定利率下, 经过一定次的利息计算后, 本金所产生的新的价值; 等年值 A , 指各年等额收入或支出的金额, 一般用等额序列表示。

资金现值与终值均为一次性支付, 如果没有强调的话, 现值对应工程开始的首年年初, 终值对应工程的最后一年年末, 等年值对应每年年末。计算资金时, 一般要把将资金换算成同一种形式, 三种资金互相换算的公式如式(22)所示。

$$X = Y \times (X/Y, p, t) \quad (22)$$

式中: p 为社会折现率, t 为成本发生的时间, 单位通常为年, $(X/Y, p, t)$ 是指考虑 p 和 t 的情况时, 由 Y 折算到 X 的折算系数。

配电变压器设备的 LCC 指设备在其寿命周期内产生的费用, 计算该费用时应当考虑资金的时间价值。求解 LCC 时, 先求出设备在其寿命周期内每年的成本, 然后根据社会贴现率以及通货膨胀率折算至设备

购买时的现值, 最后把每年对应的现值进行求和得到设备的 LCC。

$$LCC = \sum_{t=0}^{T-1} C_t \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^t \quad (23)$$

式中: T 为设备的寿命年限; C_t 为设备每年花费成本; r 为通货膨胀率, R 为社会贴现率。

因此根据上节的变压器 LCC 的各阶段的具体建模情况, 将各阶段的成本花费计算公式进行同一形式的资金时间换算可得:

$$LCC = \sum_{t=0}^{T-1} \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^t \cdot \left[\left(C_{gm} + C_{az} + C_{qt} \right) + \left(C_p + a \cdot P_g (8760)^2 \frac{x}{x+8760/T_R} + a \cdot t_{\max} \frac{S \cdot y \cdot R}{U^2} \right) \right. \\ \left. + \left((P_{m1} \cdot T_c \cdot a + A \cdot \gamma) + \left(\sum_{i=1}^K a_2 L_i \left[\sum_j^N (\lambda'_j r'_j + \lambda_j r_j) \right] \right) + \sum_{f \in B} C_{f,i} \right) \right. \\ \left. + \left(\sum_{S \in \Psi} \left[(P_{f1,s} \cdot T_s \cdot a_2) + (\eta_s C_{m,s} + [1 - \eta_s] C_{r,s}) \right] \right) + (C_{bf} - C_{cz}) \right] \quad (24)$$

5. 算例分析

根据国家及行业标准在深圳龙岗地区进行规划建设, 从两个不同厂家选择两款同类型的三相双绕组有载调压变压器进行 LCC 计算并比较, 它们共同的主要技术指标及工程数据如下。

变压器的额定容量为 100 MVA; 全生命周期寿命年限为 30; 额定电压等级为 $220 \pm 8 \cdot 1.5\% / 21$; 冷却方式为 ONAN; 联结组别号为 Ynd11; 功率因数为 0.95; 阻抗电压为 $U_k = 16\%$; 年平均负荷率为 50%; 环境年平均温度为 25°C ; 防污等级为 d 级; 所有设备抗震按 7 度计算, 8 度构造措施; 噪音水平 $\leq 65 \text{ dB (A)}$; 低压侧经接地变小电阻接地或不接地运行方式。通过行业标准规定确定的 A、B 配电变压器模型变量值如表 1 所示。

Table 1. Transformer model variable value

表 1. 变压器模型变量取值

变量名称	变量单位	A 变量取值	B 变量取值
售电电价	$a/(\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.63	0.63
购买成本	$C_{gm}/\text{元}$	58,720	72,314
运行人员成本	$C_p/\text{元}$	2314	1920
固定功率损耗	P_g/kW	56	32
故障修复时间	T_R/h	3	2.5
输送电量	$E/\text{kW} \cdot \text{h}$	3,015,600	3,015,600
最大负荷下的有功功率	$P_{A,\max}/\text{kW}$	58.2	69.3
等效电阻	R/Ω	2.17	3.10
故障率	x	0.015	0.009
负荷停电持续时间	T_c/h	4.5	2.75
检修导致单位时间失负荷量	P_{m1}/kW	3120	3120
开关操作费用	$\gamma/\text{元}$	195	210
随机失负荷单位电价	a_2/kWh	0.68	0.68
需检修的负荷节点数	K	20	20
故障导致单位时间失负荷量	P_{f1}/kW	2318	2318
其他费用比例系数	$\lambda/\%$	3	3
报废成本比例系数	α	2.5	2.5
残值成本比例系数	$\beta/\%$	3	3

其中设备 j 的检修停运率 λ'_j 、设备 j 的平均检修持续时间 r'_j 、设备 j 的故障停运率 λ_j 、设备 j 的平均故障修复时间 r_j 、设备 f 选择检修方式 i 对应的检修费用 C_{fi} 、以及 η_S 、 $C_{m,s}$ 、 $C_{r,s}$ 等指标则根据具体涉及设备参考深圳电网规划建设指标一一设定。

将上述定义变量值带入配电变压器模型中, 计算单位年限内各阶段的具体花费成本, 可得 A、B 变压器的各阶段成本对比结果如下表 2 所示。然后将 A、B 变压器 30 年寿命内每年对应的成本现值根据式 (23) 进行折算后求和所得结果如表 3 所示。

Table 2. Cost comparison of various stages of A and B transformers

表 2. A、B 变压器各阶段成本对比元

成本	变压器 A	变压器 B
初始投资成本 C_I	64,592	79,545.4
运行成本 C_O	23,539.094	15,451.421
检修维护成本 C_M	16,637.2	9771.4
故障损失成本 C_F	19,493.08	10,454.66
退役处置成本 C_D	8514.4	10,520.53
LCC	132,775.774	125,743.411

Table 3. LCC comparison of A and B transformers after conversion

表 3. 折算后 A、B 变压器 LCC 对比

成本	变压器 A	变压器 B
LCC	404.72 万元	327.62 万元

为了更清晰、直观的反映出两款变压器在全寿命年限内各阶段的成本对比情况, 将资金折算后的两款变压器每阶段成本仿真结果绘制成柱形图进行比较, 具体结果如下图 2 所示。

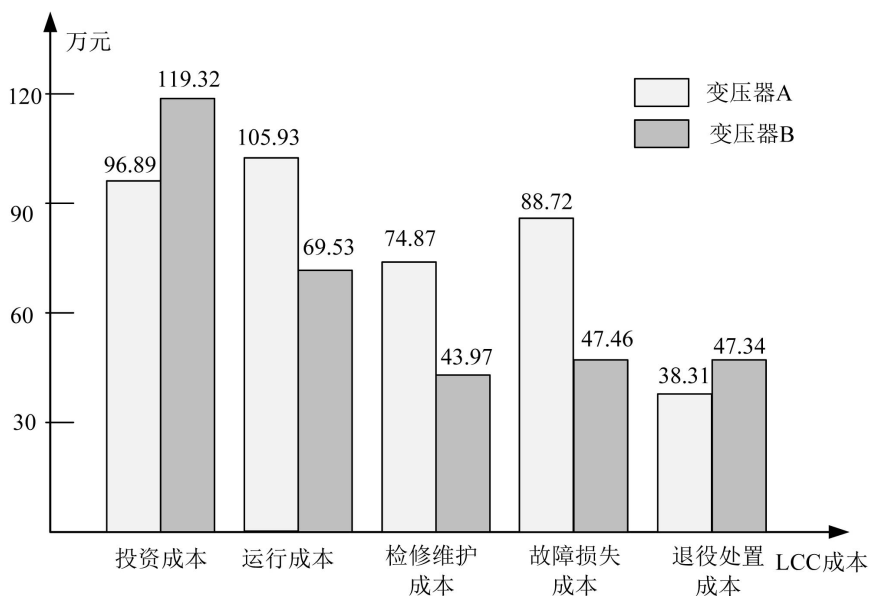


Figure 2. LCC comparison results of A and B transformers

图 2. A、B 变压器 LCC 对比结果

从图 2 结果中可看出变压器 B 的投资成本比变压器 A 高, 即变压器 B 在规划建设前期需投入更多的资金, 但在之后的运行成本、检修维护成本及故障损失成本上, 变压器 B 都较变压器 A 更节省资金。另外退役处置成本上变压器 B 也需要比变压器 A 花费更多。

进一步分析可知, 由于变压器 B 前期投资更高, 则在稳定性和智能性上要较变压器 A 更好, 针对灾害问题变压器 B 也会有更好的抵御性, 因此后续阶段的运行维护成本和故障成本也相对较低。但在故障后的设备更换和退役后的设备处置方面, 由于变压器 B 的高性能化, 因此也需要投入更多成本进行相匹配的处理。

综上所述, 在单位年限内的 LCC 成本上, 变压器 B 比变压器 A 节省 7032.363 元, 在 30 年寿命周期折算后的 LCC 上, 变压器 B 比变压器 A 节省 77.1 万元, 因此变压器 B 较变压器 A 更适合此地区的配电网规划建设。

6. 结论

针对配电网升级改造过程中的设备选型投资决策问题, 本文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, 利用资金时间价值方法, 构建配电网变压器全寿命周期成本的资金时间价值模型, 用以模拟和计算配电网变压器全生命周期成本。并且选取深圳龙岗地区配电网规划项目进行算例推演, 对选自两款不同厂家的变压器进行全生命周期成本计算。通过算例仿真, 结果证明了变压器的前期投资成本并非与最终的总 LCC 成本成正比, 对变电设备进行规划或改造时必须同时考虑 LCC 各阶段的具体影响, 才可以得到全局最优的设备建设策略。此外也证明了针对配电变压器的设备选型问题, 本文所建立模型具有适用性和有效性。

参考文献

- [1] 姚明来, 王艳伟, 刘秦南, 等. 基于全生命周期理论的公共基础设施 PPP 项目风险动态评价[J]. 工程管理学报, 2017, 31(4): 65-70.
- [2] 杨磊, 应黎明, 王玉磊. 变电站建设全生命周期成本估算研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 123-128.
- [3] Mirzadeh, I., Butt, A.A., Toller, S. and Birgisson, B. (2014) Life Cycle Cost Analysis Based on the Fundamental Cost Contributors for Asphalt Pavements. *Structure and Infrastructure Engineering*, **10**, 1638-1647. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.837494>
- [4] 罗晓初, 李乐, 魏志连, 等. 全生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.
- [5] 夏成军, 邱桂华, 黄冬燕, 等. 电力变压器全生命周期成本模型及灵敏度分析[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 26-30.
- [6] 李娜, 王晓亮, 李明, 等. 电力变压器全生命周期成本建模及其灵敏度分析[J]. 山东电力技术, 2015, 42(11): 36-39.
- [7] 尹来宾, 范春菊, 崔新奇, 等. 基于全生命周期费用(LCC)的配电装置改造的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 61-65+70.
- [8] 陈敏, 余双翔, 刘小松, 等. 基于 LCC 的海上风电场主变压器冗余配置经济性对比与分析[J]. 电力系统自动化, 2015(14): 168-174.
- [9] 李存斌, 庆格夫, 陆龚曙, 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.
- [10] 马健. 基于全生命周期成本理论的 220kV 电力变压器采购研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8763，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：sg@hanspub.org