

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.024

基于节能因素的变压器LCC评价方法研究

黄 伟¹, 赵晓凤², 蒋利民¹, 王程嘉², 闫华光¹, 韩永霞², 戴 栋²,
李立涅², 屈 博¹, 陈宋宋¹

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 为了兼顾电网经济与节能的双重目标, 笔者基于全寿命周期成本(life cycle costs, LCC)理论, 考虑节能因素, 建立了一种新的变压器设计方案LCC评价方法。通过全面分析LCC各项组成, 考虑负荷变化对负载损耗的动态影响, 提出了更加完善的变压器LCC模型, 并通过折现率与通货膨胀率对其进行了经济学修正。基于上述完善的变压器LCC模型, 引入临界电价的概念, 提出了损耗外LCC与损耗电量的对比分析方法, 实现了一个变压器LCC评价辅助决策平台。以某500 kV变压器方案比选为例, 论证了评价方法的实用性, 并验证了其节能效果。

关键词: 全寿命周期成本(LCC); 变压器; 节能; LCC评价; 辅助决策平台

Study of LCC Evaluation Method for Transformer Based on the Grid Energy Saving

HUANG Wei¹, ZHAO Xiaofeng², JIANG Limin¹, WANG Chengjia², YAN Huaguang¹,
HAN Yongxia², DAI Dong², LI Licheng², QU Bo¹, CHEN Songsong¹

(1. Chinese Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Electrical Power School of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to achieve the targets of economic benefit and environmentally friendly both, based on the life cycle costs(LCC), mainly considering the energy saving factor, this paper establishes a kind of transformer scheme evaluation method. Through a comprehensive analysis of LCC, considering the dynamic effects of load loss with the load change, this paper puts forward a more perfect LCC model of transformers, and makes a correction through the discount rate and the rate of inflation. Based on the above perfect LCC model of transformers, introducing the Critical Price, the paper proposes the contrast analysis method of LCC except electric energy loss and the power loss, and implements a LCC auxiliary evaluation platform. Taking a 500 kV transformer project scheme comparison, for example, this paper demonstrates the practicability of the evaluation methodology and verifies the energy saving effect.

Key words: life cycle cost(LCC); transformer; energy saving; LCC evaluation methodology; auxiliary evaluation platform

0 引言

合理的方案评价方法是可行性研究的有机组成部分和重要内容, 对工程造价和工程质量有着深远的意义。传统的变压器方案评价方法多以全寿命周期成本(life cycle costs, LCC)为理论依据^[1-2], 即考虑系统或设备从设计开发、制造、安装、运行、维护以及报废各个阶段的成本^[3-5]。由于 LCC 理论应用于

电力行业中存在与经济学交叉、管理部门众多等问题, 难以精确地评估其各时期内的成本, 因此到目前为止电力设备的 LCC 模型还有待进一步完善。同时, 当前中国面临着资源短缺、电网能耗巨大的现状^[6-9]。2013 年中国年发电量达 53 223 亿千瓦时, 按照 2012 年全国电网损失率 6.62% 估算, 每年约损失电能 3 523 亿度, 在 8 类终端销售电价中, 按照最便宜的居民生活电价 (北京市第一档阶梯电价 0.48 元/度) 估算, 每年线损的金额为 1 691 亿元。由此推算, 线损率降低 0.1 个百分点, 电网输电成本将降低 25 亿

元/年。因此,有必要对电网节能进行深入研究,将节能因素纳入 LCC 评价方法中,这对节能降耗和提高经济效益有重大意义。

针对上述问题,文中以变压器为研究对象,开展了考虑技术、管理和经济学方法的 LCC 模型研究,提出了完善的方法。同时,基于电网节能需求,研究了考虑节能因素和节能效果的变压器 LCC 评价方法,实现了变压器 LCC 评价辅助决策平台,为变压器设计方案评价提供参考。

1 变压器 LCC 模型完善

1.1 LCC 模型构成

变压器 LCC 是指变压器在整个寿命周期内发生的费用总和^[10-12],文中拟采用单目标函数如式(1)所示,约束条件如式(2)所示。

$$\min F = LCC = C_1 + C_0 + C_M + C_F + C_D; \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{国家行业标准} \\ \text{供电需求} \\ \text{设备运行状况} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中: C_1 为初始投资成本(investment costs); C_0 为运行成本(operation costs); C_M 为维护成本(maintenance costs); C_F 为故障成本(failure costs); C_D 为退役处置成本(disposal costs)。式(2)中:国家行业政策包括国家明令淘汰高能耗变压器,如 S7(SL7、SJ7)型变压器,同时若以新的节能型变压器替代高耗能变压器,按淘汰变压器容量给予资金补助等;供电需求包括可靠性要求、电源电磁兼容要求、特殊供电要求(如不间断供电要求)等;设备运行状况指合理的维修策略等。

1.2 初始投资成本

变压器初始投资成本 C_1 是指在建设和调试期间,其正式投入运行以前,所付出的一次性的投资成本,主要包括设备购置费、土地购置费^[13]。考虑到当前变压器“节能补贴”政策,需在初始投资成本中加入国家节能补贴(national energy-saving allowance cost, CNEA)项,为负值。文中采用工程法^[14]对各项费用进行估算,然后逐项叠加,以此来估算变压器的初始投资成本,见式(3)。

$$C_1 = \sum C_{1n} (n=1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式(3)中: C_{1n} 为第 n 个元件的投资费用; n 为元件的总个数。

1.3 运行成本

变压器运行成本 C_0 是指在运行期间所花费的一切费用总和^[15-17],包括日常巡视费和损耗费。日常巡视费主要包括巡视人员的固定工资、巡视所需的

设备费和材料费等。损耗费主要包括空载损耗费和负载损耗费。

目前计算变压器的负载损耗电量是通过平均负载率得到,见式(4)。

$$\Delta W = (P_0 + K_T \beta^2 P_k) \times t \quad (4)$$

式(4)中: ΔW 为变压器负载损耗电量; P_0 为空载损耗; K_T 为负载波动损耗系数,一般可取 1.05; β 为负载率,即一段时间内平均负载和最大负载的比值; P_k 为负载损耗; t 为运行时间。

在电力系统运行中,负荷时刻在变化,变压器的负载损耗也随之变化。为了考虑负荷动态变化对负载损耗的影响,同时负荷曲线难以给出精确的数学表达式,文中提出了分段求和法来修正这一影响,使 LCC 的计算结果更加精确、可靠,计算方法如下:

将变压器运行时间平均分为 n 等份,对每一份进行损耗估算再求和,随着分段数 n 的增大,结果逐渐趋向准确值。计算见式(5)。

$$\Delta W = P_0 t + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n K_{Ti} \beta_i^2 P_{ki} \times \frac{t}{n} \quad (5)$$

1.4 维护成本

变压器维护成本 C_M 主要包括日常维护成本和计划检修成本。目前变压器已不再使用大修、小修的检修策略,而是采用预防性试验、保护性检查相结合的方式,主要由试验班和在线监测班的相关人员完成。因此,维护成本主要包括试验班和在线监测班人员的工资以及维护所需的设备费、材料费。

1.5 故障成本

变压器故障成本 C_F 主要包括缺电成本、修复成本和惩罚成本。缺电成本是指当电力供应不完全可靠或预期不完全可靠时,由供电量减少所造成的经济损失;修复成本是指由断电到恢复正常供电需要的成本;惩罚成本是指因断电给用电方造成损失,需要赔偿的成本。因此,年故障成本计算方法见式(6)。

$$C_F = \lambda C_R + W_{EENS} \varepsilon + W_{EENS} r \quad (6)$$

式(6)中: λ 为年平均故障数; C_R 为故障平均修复成本; W_{EENS} 为期望缺供电量; ε 为输电电价; r 为产电比,元/kWh; λC_R 为修复成本; $W_{EENS} \varepsilon$ 为缺电成本; $W_{EENS} r$ 为惩罚成本。

调研和分析表明,由于变压器采用 N-1 方式运行,一般情况下变压器故障不会引起断电,即使断电也很少有赔偿情况,因此缺电成本和惩罚成本可取为零。

1.6 退役处置成本

退役处置成本 C_D 主要包括变压器生命周期结束后的清理成本和残值^[18-20],其中残值为收入,取负值。笔者对现有方法进行分析和对比后,提出两种

退役处置成本的计算方法:净残值法和定律折旧法。

1)净残值法。残值是指变压器在预期使用周期结束后可获得的价值;净残值是指残余的价值(残值)减去清理费用后的那部分价值。因此退役处置成本实为净残值的负数。通过查询电力工业企业固定资产编码表,变压器折旧年限18年,净残值占原值3%。因此,退役处置成本见式(7)。

$$C_D = -C_1 \times 3\% \quad (7)$$

2)定律折旧法照国际惯例,变压器退役后,残值为购置费的5%。因国内变压器使用寿命一般达不到其预期使用寿命,残值率也会相应提高,因此有必要对其进行加速折旧,文中选择定率法进行加速折旧。首先求得固定折旧率,见式(8)。

$$d = 1 - \sqrt[T]{\frac{K_T}{K_0}} \quad (8)$$

式(8)中: d 为设备的固定折旧率; T 为设备的折旧年限,即预期使用年限; K_0 为设备的原始价值; K_T 为设备在第 T 年末的残值。

将上述固定折旧率 d 代入式(9),得到设备 n 年退役时的残值。

$$K_n = K_0(1-d)^n \quad (9)$$

净残值法是按照初始投资的百分比来确定变压器退役处置成本,忽略了退役年限的影响,而定律折旧法考虑到变压器使用年限一般达不到预期使用寿命的现状,退役处置成本随着退役年限不同而变化,更符合实际运行情况。通过上述对比分析,文中采用定律折旧法计算退役处置成本。

2 基于折现率和通货膨胀率的经济学修正

考虑到资金的时间价值和通货膨胀,需要对变压器LCC模型进行经济学修正。文中采用现值成本法,即在对多个方案进行比选时,若诸方案的产出价值相同,或者诸方案能够满足相同的需要,就可以通过对各方案费用现值的比较进行选择。资金的时间价值采用折现率进行修正,因此,通过折现率和通货膨胀率对资金进行修正,其表达式见式(10)。

$$C_p = \sum_{t=1}^n C_t \times \frac{(1+R)^t}{(1+r)^t} \quad (10)$$

式(10)中: C_p 为资金的现值; C_t 为资金第 t 年的年值; n 为折算年限; R 为通货膨胀率; r 为折现率。

将上述经济学修正方法引入变压器LCC模型,得到基于折现率和通货膨胀率的LCC经济学修正模型,见式(11)。

$$LCC = C_1 + \sum_{t=1}^n (C_0 + C_M + C_F) \times \frac{(1+R)^t}{(1+r)^t} + C_D \times \frac{(1+R)^n}{(1+r)^n} \quad (11)$$

式(11)中: C_0 、 C_M 、 C_F 分别为运行成本、维护成本故障成本的年值;其他参数同式(10)。

为了计算简洁、方便,引入折算系数 K_{sum} 和 K ,上述修正模型可变为式(12)。

$$LCC = C_1 + (C_0 + C_M + C_F) \times K_{sum} + C_D \times K \quad (12)$$

其中 K_{sum} 和 K 分别为

$$K_{sum} = \frac{(1+R) \times [(1+r)^n - (1+R)^n]}{(1+r)^n \times (r-R)};$$

$$K = \left(\frac{1+R}{1+r} \right)^n$$

3 基于节能因素的变压器LCC评价方法

基于全寿命周期成本理念,考虑节能因素,文中提出了一种新的变压器LCC评价方法,即损耗外LCC和损耗对比分析方法。其中,“损耗外LCC”(LCC except electric energy loss, LCC_{EL})指LCC中除去损耗成本后的成本,“损耗”(electric energy loss, EEL)指损耗电量。进行方案比选时,主要有以下两种情况。

1) $LCC_{EL1} > LCC_{EL2}$, $EEL_1 > EEL_2$ 。此情况表示方案一损耗外成本 LCC_{EL} 大、损耗大,通过直观判断,方案一较差。

2) $LCC_{EL1} > LCC_{EL2}$, $EEL_1 < EEL_2$ 。此情况表示方案1损耗外成本 LCC_{EL} 大、损耗小,即方案1用成本($LCC_{EL1} - LCC_{EL2}$)换取电能($EEL_2 - EEL_1$)。因此,“方案1是否为优选方案”转换为“方案1用钱换电是否值得”问题。为了评价是否值得,同时考虑损耗EEL的时间价值,文中引入临界电价 P_0 ,其定义见式(13)。

$$LCC_{EL1} - LCC_{EL2} = \left(\frac{EEL_2}{n} - \frac{EEL_1}{n} \right) \times P_0 \times K_{sum} \quad (13)$$

求得,临界电价 P_0 为

$$P_0 = \frac{n \times (LCC_{EL1} - LCC_{EL2}) \times (1+r)^n \times (r-R)}{(EEL_2 - EEL_1) \times (1+R) \times [(1+r)^n - (1+R)^n]} \quad (14)$$

通过临界电价 P_0 与实时电价 P 进行比较,来判断方案1“是否值得”。若 $P_0 > P$,表示方案1“大钱换少电”,则方案2为最优方案,反之方案1为最优方案。其中实时电价 P 指平均电价,即居民用电、工业用电和商业用电的平均值;设备运行年限较长,应考虑随着时间推移电价的变化趋势;有时用某经济成本换取某电量,虽然从经济性考虑是不值得的,但是若可以节约大量电能,从社会整体效益来看是有利的,只要成本增加在可接受范围内,此也是值得考虑的。情况2)进行方案比选流程图见图1。

4 系统实现及实例分析

基于前面的计算公式和评价方法,实现了一个变压器LCC评价辅助决策平台,其针对下述500 kV

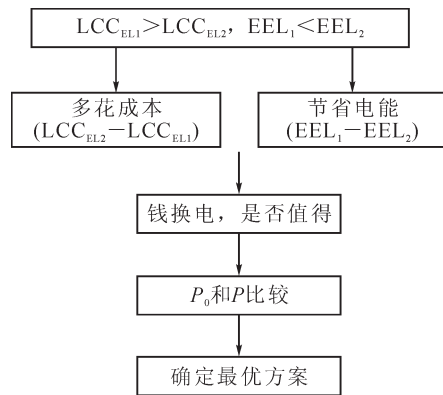


图1 方案比选流程图

Fig. 1 The flow chart of scheme comparison

变压器实例的评价结果见图2。



图2 变压器 LCC 评价结果

Fig. 2 The LCC evaluation results for transformer

文中选取华南地区某 500 kV 变压器进行实例分析,并讨论其节能效果。该变压器所在电网各季节典型日负荷曲线见图3,计算所需参数见表1。

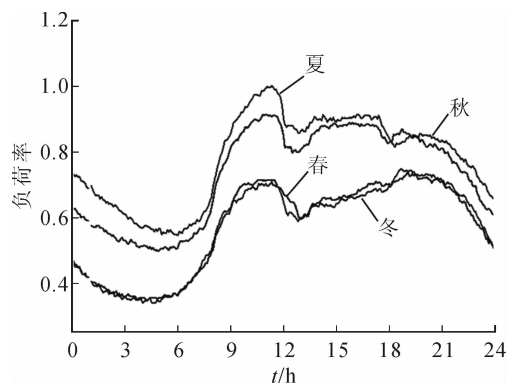


图3 该地区各季节典型日负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curves of each season

对各项成本进行计算并按式(12)进行经济学修正,取 $R=3\%$, $r=8\%$,计算结果见表2,各项成本柱状图、饼状图见图4、5。

由图5(a)、(b)可知,方案1和方案2中运行成本分别占LCC的49.99%、50.16%,由图5(c)、(d)可知,方案1、2运行成本中损耗费分别占了84.39%、

表1 算例所需参数

Table 1 The example parameters

参数	方案1	方案2
变压器容量/MVA	1 000	750
所需台数/台	3	4
采购费/(万元·台 ⁻¹)	2 670	2 310
土地购置费/万元	8 004.15	9 249.24
国家节能补贴/万元	0	0
空载损耗/kW	675	840
负载损耗/kW	4 050	4 200
平均售电电价/(元·度 ⁻¹)	0.680 73	0.680 73
运行人员总工资/(万元·年 ⁻¹)	216	216
巡视设备费、材料费/(万元·年 ⁻¹)	4	4
维护人员总工资/(万元·年 ⁻¹)	4.949	4.949
故障率/[次·(台·年) ⁻¹]	0.05	0.05
平均每次修复成本/[万元·(台·次) ⁻¹]	40	40
预期运行年限/年	30	30
实际运行年限/年	18	18

表2 两方案计算结果

Table 2 Calculation results between two schemes 万元

项目	方案1	方案2
初始投资成本 C_i	16 014.15	18 489.24
运行成本 C_o	16 661.55	17 739.63
维护成本 C_M	58.52	58.52
故障成本 C_F	70.94	94.59
退役处置成本 C_D	526.43	607.27
LCC	33 331.59	36 989.30

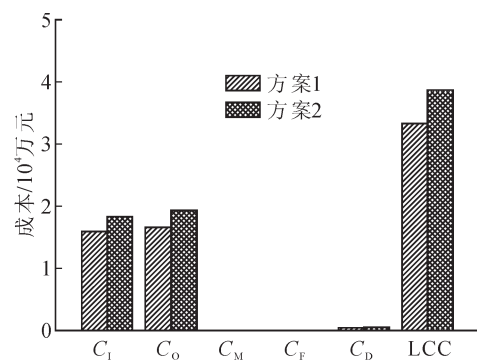


图4 两方案 LCC 柱状图

Fig. 4 Bar graph of LCC between two schemes

86.57%,即由损耗产生的成本占LCC的40%以上,因此有必要对损耗进行精确计算,在方案评价中重点考虑节能因素。

基于文中提出的损耗外LCC和损耗对比分析方法,得到500 kV输电变压器实例的除损耗外LCC成本(LCC_{EL})和损耗电量EEL,见表3。

由表3可以看出,实例中方案1为损耗外成本小、损耗小的情况,通过直观判断方案1为综合考虑成

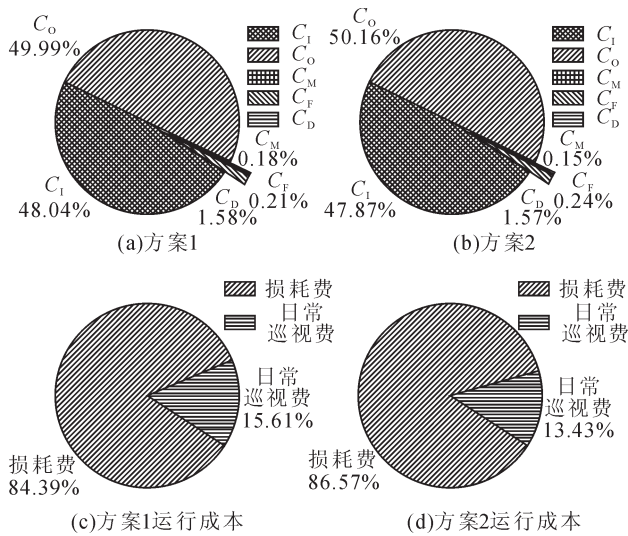


图 5 各项成本饼状图

Fig. 5 Pie chart of each costs

表 3 两方案LCC_{EL}、EEL值

Table 3 LCC_{EL} and EEL between two schemes

项目	方案 1	方案 2
LCC _{EL} /万元	19 271.32	21 850.90
EEL/(kW·h)	3.15×10 ⁸	3.75×10 ⁸

本与节能后的最优方案。其中,方案 1 总损耗为 3.15×10^8 kWh, 比方案 2 的 3.75×10^8 kWh 降低了 0.60×10^8 kWh, 即相对降低了 16.0%, 节能效果显著。

5 结论

面对电网经济和环境友好的目标, 文中针对变压器提出了考虑节能的方案评价方法, 得出结论:

1) 针对当前变压器 LCC 模型中存在的不足, 在初始投资成本中引入“节能补贴”项, 在对负载损耗的计算中提出了分段求和法, 通过对比分析后, 采用定律折旧法计算退役处置成本等;

2) 考虑资金的时间价值, 通过折现率和通货膨胀率对变压器 LCC 进行了经济学修正, 引入并推导了相应的修正系数 K_{sum} 和 K ;

3) 基于完善后的 LCC 模型, 在方案评价中引入节能因素, 提出了损耗外 LCC 与损耗对比分析方法, 通过临界电价与实时电价的对比进行方案评价, 实现了一个变压器 LCC 评价辅助决策平台。通过 500 kV 变压器实例论证了评价方法的实用性和决策平台的方便性, 最优方案降损达 16%, 说明了对 LCC 模型考虑节能因素的必要性。

参考文献:

[1] 邢海东. 输配电系统电能损耗分配问题研究[J]. 科技创

业家, 2013(22): 106-106.

XING Haidong. Study of loss allocation problem for electricity transmission and distribution system[J]. Technological Pioneers, 2013(22): 106-106.

[2] 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 Jiwei, XIE Jingdong, TANG Guoqing. Life cycle cost analysis in electrical equipment management[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4): 13-15.

[3] 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.

YIN Laibin, FAN Chunju, CUI Xinqi, et al. Study of switchgear modification based on LCC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 61-65.

[4] 蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠, 等. 全生命周期成本(LCC)技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 149-154.

CAI Yizhu, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Application review of life cycle cost (LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.

[5] 张远, 王佳. 全生命周期成本技术在电力行业中的应用[J]. 电源学报, 2013(4): 26-29.

ZHANG Yuan, WANG Jia. Application of life cycle cost technology in the power industry[J]. Journal of Power Supply, 2013(4): 26-29.

[6] 崔新奇, 尹来宾, 范春菊, 等. 变电站改造中变压器全生命周期费用(LCC)模型的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 69-73.

CUI Xinqi, YIN Laibin, FAN Chunju, et al. Study of LCC for power transformer in modification of transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 69-73.

[7] 史京楠, 韩红丽, 徐涛. 全生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.

SHI Jingnan, HAN Hongli, XU Tao. Application of life cycle costs analysis in planning design of power transformation projects[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 63-66.

[8] 武星, 殷晓刚, 魏泉, 等. 电力产品可靠性研究的本质动因和前景展望[J]. 高压电器, 2011, 47(10): 75-80.

WU Xing, YAN Xiaogang, WEI Quan, et al. Motivation and prospect of research on electrical equipment reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 75-80.

[9] 赵丽华, 高进强, 郭相国. 浅谈电力设备智能化[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 1-4.

ZHAO Lihua, GAO Jinqiang, GUO Xiangguo. Discussion on intelligent electric power equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 1-4.

[10] 何志俭. 变压器全生命周期成本优化的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2011.

- HE Zhijian. Study of life cycle cost optimization for transformers[D]. Baoding:North China Electric Power University, 2011.
- [11] 吴国威,周 辉,潘巍巍,等. 基于全寿命周期的变压器成本风险评估[J]. 华东电力, 2013, 41(3):532-536.
- WU Guowei,ZHOU Hui,PAN Weiwei,et al. Risk assessment of the transformer based on life cycle cost[J]. East China Electric Power, 2013, 41(3):532-536.
- [12] 张慧娟,赵庆生,王 英,等. 基于盲数的电力开关设备全寿命周期成本估算[J]. 高压电器, 2013, 49(11):12-16.
- ZHANG Huijuan,ZHAO Qingsheng,WANG Ying,et al. Life cycle cost estimation of power switchgears based on blind number theory[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11):12-16.
- [13] 邓小聘. 基于全寿命周期成本的变压器投资决策及维修优化模型研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- DENG Xiaopin. Study on investment decision and maintenance optimization model of transformers based on life cycle cost[D]. Chongqing:Chongqing University, 2011.
- [14] 牛东晓,郭皓池,胥永兰,等. 基于全寿命周期成本应用分析的电网企业决策支持方法研究[J]. 华东电力, 2014, 42(1):54-57.
- NIU Dongxiao,GUO Haochi,XU Yonglan,et al. Research on decision support strategies of power grid enterprises based on LCC application analysis[J]. East China Electric Power, 2014, 42(1):54-57.
- [15] 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.
- LI Tao,MA Wei,HUANG Xiaobei. Power transformation equipment management based on life cycle cost theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(11):50-53.
- [16] 刘有为,马 麟,吴立远,等. 电力变压器经济寿命模型及应用实例[J]. 电网技术, 2012, 36(10):235-240.
- LIU Youwei,MA Lin,WU Liyuan,et al. Economic life model of power transformer and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(10):235-240.
- [17] 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.
- XIA Chengjun,QIU Guihua,HUANG Dongyan,et al. Life cycle cost model and sensitivity analysis of power transformer[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1):26-30.
- [18] 刘汉生,刘 剑,李俊娥,等. 基于全寿命周期成本评估的特高压直流输电线路导线选型[J]. 高电压技术, 2012, 38(2):310-315.
- LIU Hansheng,LIU Jian,LI Jun'e,et al. Conductors selection of UHVDC transmission lines based on life cycle cost[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2):310-315.
- [19] 李 林,刘芳芳,谢光彬. 基于全寿命周期成本理论的架空线选型方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(6):23-28.
- LI Lin,LIU Fangfang,XIE Guangbin. The research on overhead line selection based on the life cycle cost theory [J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(6):23-28.
- [20] 王 鑫,白 宁,刘利雄. 基于 LCC 的 10 kV 配电线路改造方案研究[J]. 华东电力, 2011, 39(4):620-623.
- WANG Xin,BAI Ning,LIU Lixiong. LCC-based reconstruction schemes of 10 kV distribution lines[J]. East China Electric Power, 2011, 39(4):620-623.

黄 伟(1980—),男,硕士,主要研究方向为供用电领域节能技术、能效测试与节能评估技术。