

DOI: 10.7667/PSPC162045

配网开关柜全生命周期成本模型及敏感度分析

苏东¹, 马仲能¹, 李成翔², 谢家正², 夏成军²

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 基于全生命周期成本理论, 建立考虑资金时间价值的配网开关柜全生命周期采购成本、运行成本、故障成本和报废成本的计算模型和敏感度分析的计算方法。对配网开关柜全生命周期各阶段成本进行分析, 确定配网开关柜质量和采购成本的平衡点。结合实际算例, 对配网开关柜全生命周期成本的各阶段成本和敏感度进行分析。找出了影响配网开关柜全生命周期成本的关键成本因素, 提出了减少配网开关柜全生命周期成本的方法。

关键词: 配网开关柜; 全生命周期成本模型; 敏感度分析; 关键成本因素

Life cycle cost model and sensitivity analysis of switchgear

SU Dong¹, MA Zhongneng¹, LI Chengxiang², XIE Jiazheng², XIA Chengjun²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Corporation, Guangzhou 510620, China;

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

Abstract: Based on the theory of life cycle cost, the model of life cycle cost of switchgear considering the value of time is established. The model includes calculation method of purchase cost, operation cost, failure cost, scrap cost and sensitivity analysis of switchgear. Different stages of the life cycle cost are analyzed and balance point between the quality and the purchasing cost is found. A practical example is illustrated to analyze the proportion and sensitivity of cost in different stages. The key factors of the life cycle cost of switchgear are found and the methods of reducing the life cycle cost of switchgear are put forward.

This work is supported by National Key Research & Development Program of China “Techniques and Equipment of Smart Grid” (No. 2016YFB0901300).

Key words: switchgear; life cycle cost model; sensitivity analysis; key cost factor

0 引言

配网开关柜是重要的电能分配和保护控制设备, 通常采用断路器或负荷开关作为主元件, 根据电气初次主接线图的设计要求, 将有关的高低电压器如母线、载流导体和绝缘子等装配在封闭的金属柜体内, 实现接受和分配电能的目的。配网开关柜使用量大、形式多样、分布广泛。由于种种原因, 开关柜在电网运行中发生事故较多, 严重威胁电网的安全运行。

配网开关柜全生命周期按时间可分为采购成本和未来成本, 未来成本包括运行成本、检修成本、

故障成本和报废成本。目前文献基本上围绕全生命周期各阶段运行成本进行管理, 未将物资采购和品质控制结合起来找到一个质量和采购成本的平衡点。当前在招投标过程中对产品质量的评价反映在对供应商的评价, 通过供应商评估、业绩评分、专家打分和技术评分等方式确定, 主观随意性较大。由于产品质量通过后期的运行维护成本、检修成本和故障成本反映出来, 产品质量好, 后期成本低, 但通常采购成本高; 采购成本低时, 通常后期成本高, 全生命周期成本不一定低。但是采购成本高并不能代表着开关柜质量好, 这是由于一些配网开关柜的生产厂家在投标时报价虚高, 其报价高于该质量水平的开关柜的合理价格。供电企业需要一个合理的标准来综合评价配网开关柜的质量与采购成本。本文基于全生命周期成本理论, 建立考虑资金时间价值配网开关柜全生命周期采购成本、运行成

基金项目: 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项(2016YFB0901300); 南方电网公司科技项目(GZM2015-1-0002)

本、故障成本和报废成本的计算模型和敏感度分析方法, 找出影响配网开关柜全生命周期成本的关键成本因素, 确定质量和采购成本的平衡点, 提出减少配网开关柜全生命周期成本的方法, 同时也为供电企业在采购配网开关柜时提供参考意见。

1 配网开关柜全生命周期成本计算模型

配网开关柜的 LCC 是指开关柜从采购、安装、运行、维修和故障赔偿一直到报废回收这段时间的总的费用。配网开关柜 LCC 包括采购成本、运行成本、检修成本、故障成本和报废成本^[1-4], 如图 1。

$$LCC = C_{cs} + C_{yx} + C_{jx} + C_{gz} + C_{bf} \quad (1)$$

式中: C_{cs} 为采购成本; C_{yx} 为运行成本; C_{jx} 为检修成本; C_{gz} 为故障成本; C_{bf} 为报废成本。

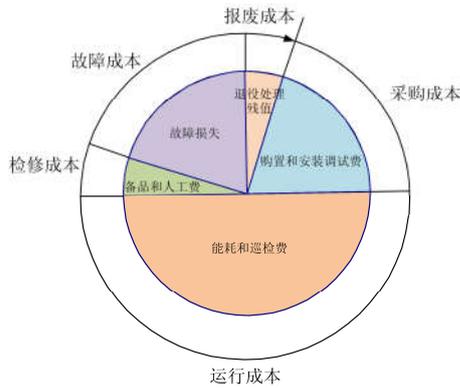


图 1 配网开关柜全生命周期成本构成

Fig. 1 Constitute of LCC of switchgear

从全生命周期考虑前期采购配网开关柜质量的好坏将直接影响检修成本和故障成本, 通过提高开关柜质量水平, 可以降低配网开关柜检修成本和故障^[5-7]。不同质量水平下故障成本、运行检修成本和采购成本是不同的。前期的采购成本增加, 未来的故障成本和检修成本就会降低; 前期的采购成本减少, 未来的故障成本和运行检修成本就会相应地增加。供电企业不会为了降低故障成本和运行检修成本, 无限地增加采购成本, 同样也不会为了减少采购成本, 而降低供电的可靠性。

1) 配网开关柜的采购成本模型

配网开关柜的采购成本是指开关柜在投入运行以前所需要支付的费用之和^[8], 根据国内多家主流配网开关柜制造厂家调研结果与一般性的配网开关柜财务会计准则, 配网开关柜采购成本包括为了满足基本要求采购成本和为提高质量水平的额外增加的采购成本, 基本采购成本指的是为满足基本要求而花费的购置费和安装调试成本, 购置费包括部件

的成本、工资, 试验及检测费、厂房及设备费、管理费、资金成本和税费等。安装调试费包括设备运输费、设备建设安装费和设备投运前的调试费。提高质量水平额外增加的采购成本与质量水平有直接关系, 将影响全生命周期故障成本和运行检修成本的大小。

$$C_{cs} = C_{cs0} + C_{cs1} = C_{cs0} - K_{\delta}(C_{gz} + C_{jx}) \quad (2)$$

式中: C_{cs0} 为基本的购置费和安装调试费; C_{cs1} 为提高质量水平要求而增加的成本; K_{δ} 是不同质量水平对 C_{gz} 故障成本和 C_{jx} 运行检修成本影响系数。

2) 配网开关柜的运行成本模型

配网开关柜运行成本就是指开关柜在运行期间发生的一切费用的总和, 包括能耗成本和巡检成本。能耗成本主要是由于开关柜内阻发热所损失的电能转换成电费的成本, 每年的能耗费可以通过能耗乘以电费乘以每年的运行时间来计算, 在计算巡检成本时, 可以用每年的巡视小时数乘以每小时的巡视检查人力成本得到。

$$C_{yx} = \sum_{i=0}^{n-1} \left[C_{nh/n} \times \left(\frac{1+R}{1+r} \right)^i + C_{xj/n} \times \left(\frac{1+Y}{1+r} \right)^i \right] \quad (3)$$

式中: $C_{nh/n}$ 为年能耗成本; $C_{xj/n}$ 是年巡检成本。

3) 配网开关柜的检修成本

检修成本 C_{jx} 是进行检修时所替换的备品备件的成本和检修时所需要的人工成本。通过对开关柜进行检修维护, 可以提高其运行时的可靠性, 延长设备的使用寿命^[9-10]。配网开关检修成本如式(4)所示。

$$C_{jx} = \sum_{i=1}^2 C_{bp/10} \times \left(\frac{1+R}{1+r} \right)^{10 \times i} + \sum_{i=1}^5 C_{bp/5} \times \left(\frac{1+R}{1+r} \right)^{5 \times i} + \sum_{i=0}^{n-1} C_{rg/n} \times \left(\frac{1+Y}{1+r} \right)^i \quad (4)$$

式中: $C_{bp/10}$ 和 $C_{bp/5}$ 分别为每 10 年和每 5 年更换的备品成本, 由配网开关柜主要原器件的更换周期表得到; $C_{rg/n}$ 为每年检修时所花费的人工成本, 可由年检修时间乘以每小时巡视检查成本得到。

4) 配网开关柜的故障成本

配网开关柜的故障成本是指开关柜在故障后所需要的故障修复成本和故障后造成停电的损失。一般来说开关柜厂家都会有相应的保修条例, 为了便于计算分析, 可只考虑配网开关柜故障后的损失成本^[11-13], 其计算公式为

$$C_{gz} = \sum_{i=0}^{n-1} C_{gz/n} \times \left(\frac{1+R}{1+r} \right)^i \quad (5)$$

式中, $C_{gz/n}$ 是年故障成本, 可由平均故障损失乘以年平均停运小时数和故障时每小时中断传输的电量

得到。

5) 配网开关柜的报废成本

报废成本是指设备在报废后所需要的用于处理废弃设备的费用，电气设备会保留有一定的残值，所以在正常回收后其成本应是一个负数，需要结合历史数据进行分析^[14]。报废成本由退役处理费和残值两部分组成。

$$C_{bf} = (C_{ty} + C_{cz}) \times \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^{n-1} \quad (6)$$

式中： C_{ty} 为退役处理费； C_{cz} 为开关柜残值。

2 全生命周期成本敏感度分析

敏感度分析是定量分析数学模型输入变量对输出结果影响程度的方法。通过对配网开关柜 LCC 进行敏感度分析，可以找出那些对配网开关柜 LCC 有显著影响的关键因素，有效控制来减少配网开关柜 LCC，从而获取较好的经济效益^[15-17]。开关柜全生命周期成本敏感度定义为

$$S_{mn} = \frac{\partial LCC}{\partial C_x} \quad (7)$$

式中： LCC 是全生命周期成本函数； C_x 是采购成本、运行成本、检修成本、故障成本和报废成本各阶段成本函数。

根据上述对开关柜各部分成本的分析 and 建模，可将开关柜 LCC 计算模型整理为

$$LCC = C_{cs} + \sum_{i=0}^{n-1} \left[(C_{nh/n} + C_{gz/n}) \times \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^i + (C_{xj/n} + C_{rg/n}) \times \left(\frac{1+Y}{1+r}\right)^i \right] + \sum_{i=1}^2 C_{bp/10} \times \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^{10xi} + \sum_{i=1}^5 C_{bp/5} \times \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^{5xi} + (C_{ty} + C_{cz}) \times \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^{n-1} \quad (8)$$

1) 采购成本敏感度为

$$\frac{\partial LCC}{\partial C_{cs}} = 1 - K_{\delta} (C_{gz} + C_{jx}) \quad (9)$$

采购成本不仅与购置成本和安装调试成本有关，还与质量水平下的故障成本和检修成本有关。

2) 运行成本敏感度为

$$\frac{\partial LCC}{\partial C_{nh/n}} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^i \quad \frac{\partial LCC}{\partial C_{xj/n}} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1+Y}{1+r}\right)^i \quad (10)$$

运行成本的影响因素有年能耗成本($C_{nh/n}$)和年巡检成本($C_{xj/n}$)。年能耗成本的大小由配网开关柜的内阻和额定电流决定，年巡检成本的大小是由每年的巡视小时数和每小时的巡视检查人工成本所决定。运行成本在配网开关柜 LCC 中的敏感度是由年

薪酬增长率 Y 和贴现率 r 所决定。

3) 检修成本敏感度为

$$\begin{cases} \frac{\partial LCC}{\partial C_{bp/10}} = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^{10xi} \\ \frac{\partial LCC}{\partial C_{bp/5}} = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^{5xi} \\ \frac{\partial LCC}{\partial C_{rg/n}} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1+Y}{1+r}\right)^i \end{cases} \quad (11)$$

检修成本的影响因素有每 10 年更换的备品成本($C_{bp/10}$)、每 5 年更换的备品成本($C_{bp/5}$)和年检修人工成本($C_{rg/n}$)所决定。年检修成本的大小是由每年的检修小时数和每小时的检修人力成本所决定，检修成本在配网开关柜 LCC 中的敏感度是由年薪酬增长率 Y 和贴现率 r 所决定。

4) 故障成本敏感度为

$$\frac{\partial LCC}{\partial C_{gz/n}} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^i \quad (12)$$

故障成本的影响因素是年故障损失，是由平均故障损失、年平均停运小时数和故障时每小时中断传输的电量相乘得到的，在配网开关柜 LCC 中的敏感度是由通货膨胀率 R 和贴现率 r 所决定的。

5) 报废成本敏感度为

$$\frac{\partial LCC}{\partial C_{ty}} = \frac{\partial LCC}{\partial C_{cz}} = \left(\frac{1+R}{1+r}\right)^{n-1} \quad (13)$$

报废成本是由退役处理费和残值所决定的，在配网开关柜 LCC 中的敏感度是由通货膨胀率 R 和贴现率 r 所决定。

3 算例分析

现以 2 个配网开关柜生产厂家生产的同类型的配网开关柜 A、B 为例进行配网开关柜的 LCC 计算并进行对比分析。配网开关柜的电压等级为 10 kV，使用寿命一般以 30 年计。配网开关柜相关基础数据如表 1 所示。

表 1 配网开关柜基础数据

Table 1 Basic data of switchgear

| 配网开关柜 | A | B |
|----------------------|-------|-------|
| 购置费/万元 | 126 | 150 |
| 开关柜内阻/ $\mu\Omega$ | 150 | 130 |
| 年巡检时间/台·h | 520 | 400 |
| 备品成本/台·次·元(每 5 年更换) | 305 | 260 |
| 备品成本/台·次·元(每 10 年更换) | 770 | 900 |
| 年检修时间/台·h | 100 | 70 |
| 年故障停电时间/台·h | 0.205 | 0.187 |

根据式(2)一式(6)对全生命周期内采购成本、运行成本、检修成本、故障成本和报废成本进行计算,可得配网开关柜 A、B 全生命周期各阶段的成本如表 2 所示。

表 2 配网开关柜 LCC 各部分成本
Table 2 Each part of LCC of switchgear

| 配网开关柜 | | 万元 | |
|-------|-------|--------|--------|
| | | A | B |
| 采购成本 | 购置费 | 126.32 | 150.00 |
| | 安装调试费 | 12.63 | 15.00 |
| 运行成本 | 能耗费 | 39.51 | 34.24 |
| | 巡检成本 | 327.24 | 251.24 |
| 检修成本 | 备品成本 | 2.37 | 2.62 |
| | 人工成本 | 4.81 | 3.37 |
| 故障成本 | 故障成本 | 120.24 | 109.68 |
| 报废成本 | 退役处理费 | 1.77 | 2.10 |
| | 残值 | -2.77 | -3.29 |

配网开关柜全生命周期按时间可分为采购成本,未来成本包括运行成本、故障成本、报废成本。各阶段成本对配网开关柜全生命周期成本的影响不同,以开关柜 A 为例进行比例分析,开关柜 A 各部分成本比例如图 2 所示。

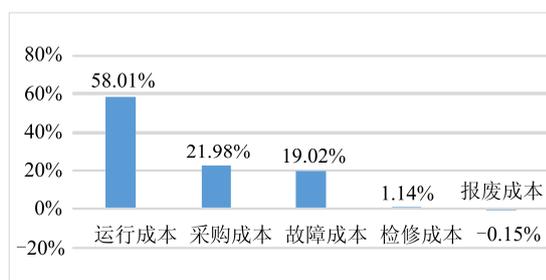


图 2 各部分成本占全生命周期成本比例
Fig. 2 Ratio of each part of LCC

配网开关柜的使用年限一般为 30 年,通货膨胀率取 4%,贴现率取 7%,将各参数代入式(9)一式(13)可得各阶段成本敏感度,并结合图 2 对各部分成本的占比及其敏感度进行分析。

1) 采购成本

$$\frac{\partial LCC}{\partial C_{cs}} = 1 - K_{\delta}(C_{gz} + C_{jx})$$

由图 2 可以看出采购成本占总成本的比例为 21.98%,虽然采购成本在 LCC 中的占比较高,其敏感度与故障成本和运行检修成本有关,采购成本高意味着开关柜质量好,维护频率将减少,导致运行成本、检修成本和故障成本降低。

2) 运行成本

运行成本敏感度为

$$\frac{\partial LCC}{\partial C_{nh/n}} = 20.04, \frac{\partial LCC}{\partial C_{xj/n}} = 26.09$$

敏感度很高,且由图 2 看出运行成本在 LCC 中的比重超过一半,所以运行成本对开关柜 LCC 具有极大的影响,而运行成本是由能耗成本和巡检成本组成,降低能耗成本和巡检是减少开关柜 LCC 的关键措施。部分购置成本较低的配网开关柜的通流回路铜排材质和质量不过关,铜排材质工艺存在问题,所含杂质较多,电阻率较大,回路电阻大,能耗大,运行发热严重。尽管在设备初始选型或者设备改造中选择低能耗开关柜其初始采购成本相对较大,但回路电阻低的开关柜能够大大减少功率损耗,降低开关柜的运行成本。优化配网开关柜巡检频率、内容和耗时等巡检计划是降低配网开关柜运行成本的关键措施。

3) 检修成本

检修成本敏感度为

$$\frac{\partial LCC}{\partial C_{bp/10}} = 1.32, \frac{\partial LCC}{\partial C_{bp/5}} = 3.84, \frac{\partial LCC}{\partial C_{rg/n}} = 26.09$$

在检修成本中,每 10 年和每 5 年更换的备品成本的敏感度和其在 LCC 中的占比都很低,对 LCC 的影响较小。人工成本的敏感度达到了 26.09%,表明其变化对 LCC 的影响很大,因而合理地制定开关柜检修计划,可根据故障停电时间来调整检修周期,当开关柜年故障停电时间上升时,减小备品更换周期增大检修时间使开关柜保持在良好的运行状态,当开关柜的年故障停电时间降低时,保持检修周期不变或适当增加以降低检修成本。

4) 故障成本

故障成本敏感度 $\frac{\partial LCC}{\partial C_{gz/n}} = 20.04$, 处于较高的水

平,而且故障成本在 LCC 中的占比较大,达到 19.02%,表明故障成本对 LCC 的影响很大。开关柜的采购成本影响着开关柜的质量,进而影响开关柜的年故障停电时间,因此在采购开关柜时适当提高采购成本选择质量高的产品可以降低开关柜的故障成本。

5) 报废成本

报废成本敏感度 $\frac{\partial LCC}{\partial C_{ty}} = \frac{\partial LCC}{\partial C_{cz}} = 0.44$, 而且

由图 2 看出报废成本在 LCC 中的占比为-0.15%,表明其报废将产生一定的残值,对 LCC 的影响较小。

配网开关柜前期的采购成本不同将对未来的运行成本、故障成本、报废成本造成不同的影响,以开关柜 A 和开关柜 B 各阶段成本进行比较分析,如表 3 所示。

表 3 配网开关柜 A 和 B 全生命周期成本构成
Table 3 Constitute of LCC of switchgear A and B

| 配网开关柜 | 采购成本 | 运行成本 | 检修成本 | 故障成本 | 报废成本 | 万元 | |
|-------|--------|--------|------|--------|-------|--------|--|
| | | | | | | LCC | |
| A | 138.95 | 366.75 | 7.18 | 120.24 | -1.00 | 632.12 | |
| B | 165.00 | 285.48 | 5.99 | 109.68 | -1.19 | 564.96 | |
| 差值 | -26.05 | 81.27 | 1.19 | 10.56 | 0.19 | 67.16 | |

由表 3 可知,虽然前期开关柜 B 的采购成本比开关柜 A 高 26.05 万元,但开关柜 B 的运行成本、检修成本,故障成本分别比开关柜 A 的低 81.27 万元、低 1.19 万、低 10.56 万元,故开关柜 B 的 LCC 要比开关柜 A 的 LCC 低 67.16 万元。因此,从全生命周期成本的角度来看,在采购时应该选择前期采购成本稍高但后期运行成本和故障低的开关柜 B。配网开关柜的质量高,其采购成本一定高,而质量水平影响未来的运行成本、检修成本和故障成本,开关柜质量水平高,维护频率将减少,运行成本、检修成本和故障成本降低,从全生命周期成本来看对供电企业更加有利。

4 小结

本文基于全生命周期成本理论,建立考虑资金时间价值配网开关柜全生命周期各阶段计算模型和敏感度分析方法,确定质量和采购成本的平衡点,并结合算例分析各阶段成本对开关柜 LCC 成本的影响程度,得到以下结论:

1) 配网开关柜采购成本和质量水平之间有一定的联系,质量水平高的配网开关柜其采购成本一定高,反之,采购成本高其质量水平不一定高。配网开关柜的质量水平将直接影响未来的运行成本、检修成本和故障成本,配网开关柜质量水平高,采购成本高,意味着开关柜质量好,维护频率将减少,从而使运行成本、检修成本和故障成本降低。

2) 运行成本由能耗成本和年检修成本构成,在 LCC 中的比重超过一半,在配网开关柜 LCC 中的敏感度是由通货膨胀率、贴现率、年薪酬增长率所决定,通过降低配网开关柜回路电阻和优化巡检频率、内容和耗时等可降低配网开关柜运行成本。

3) 检修成本由备品成本和检修人工成本构成,在 LCC 中占比较小,在配网开关柜 LCC 中的敏感

度是由通货膨胀率、贴现率、年薪酬增长率所决定,因而合理地制定开关柜检修计划和根据故障停电时间来调整检修周期,可降低开关柜的检修成本。

4) 故障成本由故障概率和故障损失造成,在 LCC 中占比较大,在配网开关柜 LCC 中的敏感度是由通货膨胀率和贴现率所决定,在采购开关柜时适当提高采购成本选择质量高的产品可以降低开关柜的故障成本。

5) 报废成本是由退役处理费和残值所决定的,在 LCC 中的占比较小,甚至产生一定的残值为负值。在配网开关柜 LCC 中的敏感度是由通货膨胀率 R 和贴现率 r 所决定。

参考文献

- [1] 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.
- [2] HINOW M, MEVISSSEN M. Substation maintenance strategy adaption for life-cycle cost reduction using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 197-204.
- [3] 滕乐天,陈红兵,王怡风. LCC 在设备采购中的应用实践[J]. 华东电力, 2007, 35(10): 27-29.
TENG Letian, CHEN Hongbing, WANG Yifeng. Application of LCC to equipment purchase[J]. East China Electric Power, 2007, 35(10): 27-29.
- [4] 岳云力,李顺昕,傅守强,等. 基于资产全寿命周期成本管理的输电网规划方案比选研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(5): 65-70.
YUE Yunli, LI Shunxin, FU Shouqiang, et al. The scheme comparison study for transmission network planning based on LCC[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(5): 65-70.
- [5] 潘乐真,张焰,俞国勤,等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 91-94.
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [6] 戴志辉,张天宇,刘譞,等. 面向状态检修的智能变电站保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 14-21.
DAI Zhihui, ZHANG Tianyu, LIU Xuan, et al. Research on smart substation protection system reliability for

- condition-based maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 14-21.
- [7] 陈海涵. 供电企业检修运维班组工作量评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 157-164.
CHEN Haihan. Research on team workload assessment of overhaul and maintenance operation of power supply enterprise[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 157-164.
- [8] 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]. 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.
- [9] 黎翡娟, 李存斌, 郑书誉, 等. 基于资产全寿命周期协同管理模式的电网企业“三流”合一运作分析与研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(5): 28-33.
LI Feijuan, LI Cunbin, ZHENG Shuyu, et al. Analysis on three flows collaboration operation based on LCAM in power grid enterprise[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(5): 28-33.
- [10] 路石俊, 李翔. 基于盲数理论的变电站工程全寿命周期成本估算[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 141-145.
LU Shijun, LI Xiang. Full life-cycle cost estimation of substation project based on blind number theory[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 141-145.
- [11] 王松, 宣晓华, 陆承宇. 智能变电站配置文件版本管理方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 95-98.
WANG Song, XUAN Xiaohua, LU Chengyu. Version management method of substation configuration file[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 95-98.
- [12] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 148-153.
YE Yuanbo, SUN Yueqin, HUANG Taigui, et al. Online state detection and fault diagnosis technology of relay protection secondary circuits in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 148-153.
- [13] 韩帮军, 范秀敏, 马登哲. 有限时间区间预防性维修策略的优化[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(5): 679-682.
HAN Bangjun, FAN Xiumin, MA Dengzhe. Optimal policy research of preventive maintenance in finite time horizon[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(5): 679-682.
- [14] 赵颖. 基于全寿命周期管理理论的青岛错埠岭220 kV 输变电项目管理研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
ZHAO Ying. The study of Qingdao Cuo-bu-ling transformation equipment item management based on life cycle cost theory[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [15] 刘胜利, 曹阳, 冯跃亮, 等. 配电网投资效益评价与决策模型研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 119-123.
LIU Shengli, CAO Yang, FENG Yueliang, et al. Research and application of grid investment effectiveness evaluation and decision-making model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 119-123.
- [16] 胡大建. 10 kV 和 20 kV 开关柜技术与经济分析[J]. 电工电气, 2009(10): 1-3.
HU Dajian. 10 kV and 20 kV switchboards technology and economic analysis[J]. Electrotechnics Electric, 2009(10): 1-3.
- [17] 徐岩, 迟成. 基于 LCC 管理的变电站主接线的风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 74-80.
XU Yan, CHI Cheng. Risk assessment of substation main connection based on LCC management[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 74-80.

收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2017-07-21

作者简介:

苏东(1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力设备质量控制工作; E-mail: m18620849961@163.com

马仲能(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力设备质量控制工作; E-mail: 893391924@qq.com

李成翔(1994—), 男, 硕士研究生, 通信作者, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、HVDC 及 FACTS。E-mail: lcx893391924@126.com

(编辑 周金梅)