

基于盲数理论的变电站工程全寿命周期成本估算

路石俊, 李翔

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京市 昌平区 102206)

Full Life-Cycle Cost Estimation of Substation Project Based on Blind Number Theory

LU Shi-jun, LI Xiang

(School of Economy and Management, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: There are many uncertain impacting factors in full life-cycle cost (LCC) of substation, and the blind information affects the accuracy of estimation result of LCC. To quantitatively analyze the affects of blind information on substation cost the blind number theory is led in and a blind number model of full life-cycle cost of substation is built. Taking a certain substation for example, its full life-cycle cost is estimated by qualitative expert forecasting method. The estimation results show that comparing with traditional deterministic model, possible distribution intervals of full life-cycle of substation can be attained by blind number model, in addition, the confidence levels of different intervals can also be obtained, and it makes the estimation results more reasonable and creditable. The proposed method is available for reference to cost optimization of substation project.

KEY WORDS: substation project; full life-cycle cost (LCC); blind number theory

摘要: 变电站全寿命周期成本(full life-cycle cost, LCC)中包含许多不确定影响因素, 这些盲信息影响着 LCC 估算值的准确度。为量化分析盲信息对变电站成本的影响, 引入盲数理论, 建立了变电站 LCC 的盲数模型, 以某变电站为例, 采用定性专家预测法对其 LCC 进行估算。结果表明: 与传统的确定性模型相比, 盲数模型能够得出 LCC 的可能分布区间, 还可以得出各个区间的可信度, 这使得估算结果更加合理可信, 对于变电站工程项目的成本优化具有参考价值。

关键词: 变电站工程; 全寿命周期成本; 盲数理论

0 引言

变电站工程建设是一种复杂的系统性项目, 在各阶段确保工程质量的前提下, 合理降低造价, 提高投资的经济效益, 是电力企业努力追求的目标。

变电站工程的寿命周期很长(其服役年限一般能达到 30~50 a), 这就给工程的成本分析带来了许多风险和不确定性^[1-4]。这种不确定性包括数据不完全、随机性和含糊性等, 而传统的概率和统计学分

析只能处理随机不确定性, 为解决此问题, 国内一些学者将人工智能、模糊数学、灰色系统等理论引入到变电站工程投资决策中^[5], 建立投资估算模型, 并取得了比较满意的成果, 但是这些模型都不包括对项目使用期运行和维护成本的管理, 没有形成一个闭环的控制过程^[6-8]。因此有必要应用全寿命周期成本(full life-cycle cost, LCC)理论对变电站工程项目成本进行管理。

本文将首先建立变电站工程 LCC 模型, 同时引入盲数理论来处理其中存在的多种不确定信息, 把人们的思维和运用经验的不确定过程, 用数学的形式科学、具体地表现出来, 进而对变电站 LCC 进行优化管理, 以提高工程投资效益。

1 变电站工程全寿命周期成本估算

1.1 变电站工程的全寿命周期成本

LCC 也被称为全寿命周期费用。早在 20 世纪 60 年代, 美国就提出了全寿命周期的概念, 美国国家标准手册中对 LCC 的定义是: 一个建筑物或建筑物系统在一段时期内的拥有、运行、维护和拆除等总的折现后的货币成本^[9]。

要计算变电站工程 LCC, 首先需要对该工程成本进行细分。根据我国电力工业特点以及计算的需要, 将我国变电站工程的寿命周期成本分为基本建设成本、运行维护成本、大修及技术改造成本、惩罚成本和设备剩余值 5 部分^[10]。基本建设成本包括建筑安装工程成本、设备购置成本、动态投资成本、其他费用等; 运行维护成本包括能源消耗成本、维护保养成本、人工成本、环境成本等; 惩罚成本主要指由于电网电力供给不足或中断所造成的用户缺电损失, 即需求侧的缺电成本; 剩余值是整个工程在分析周期期末时的残余价值, 在实际计算中, 残

值多以初始建设成本的百分比来表示。

LCC 的计算必须考虑资金的时间价值,即利用基准折现率将寿命周期的全部成本折算成初始投资年限的资金现值。在采用现行价格时,基准折现率可以按部门或行业来确定。在此先将变电站各个阶段的成本用现值表达式表示出,然后加总就得到 LCC 的现在表达式。

初始建设成本 C_0 的现值(即从第 0 年到第 k 年的建设总投资)表达式为

$$C_0 = \sum_{t=0}^k \frac{c_{0t}}{(1+i)^t} \quad (1)$$

式中: c_{0t} 表示第 t 年的建设投资额; i 为折现率。

设从第 l 年产生运行费用,则运行维护成本的现值表达式为

$$C_v = \sum_{t=l}^T \frac{c_{vt}}{(1+i)^t} \quad (2)$$

式中: c_{vt} 表示第 t 年的运行维护成本; T 为变电站服务年限。

设从第 m 年产生大修费用,则大修技改成本的现值表达式为

$$C_f = \sum_{t=m}^T \frac{c_{ft}}{(1+i)^t} \quad (3)$$

式中 c_{ft} 表示第 t 年的大修技改成本。

设从第 x 年产生惩罚成本,则惩罚成本的现值表达式为

$$C_m = \sum_{t=x}^T \frac{c_{mt}}{(1+i)^t} \quad (4)$$

式中 c_{mt} 表示第 t 年产生的惩罚成本。

第 T 年年末残值的现值表达式为

$$C_s = c_{st} / (1+i)^T \quad (5)$$

式中 c_{st} 表示第 T 年年末的残值。

由此我们可以得到变电站工程的全寿命周期成本的计算公式为

$$C_{LCC} = C_0 + C_v + C_f + C_m + C_s \quad (6)$$

1.2 变电站工程各成本的不确定影响因素分析

关于变电站工程各成本的不确定影响因素分析如下:

1) 初始化建设成本 C_0 的不确定影响因素。

C_0 即某个变电站工程在从计划、设计到实施、工程建设完成这一过程中所发生的成本和费用。目前我国对 C_0 多是根据行业规定,以传统定额作为计价依据进行估算,现在其估算理论已经比较成熟,成本的变化幅度不大,并且不确定因素对它的

影响不是很大,因此本模型在计算时主要考虑运营维护的不确定因素。 C_0 由相应项目的概预算来确定,按确定性指标来处理。

2) 运行维护成本 C_v 的不确定影响因素。

C_v 属于年度周期成本,是在研究周期内每年都会发生的成本。日常的运行维护成本大多与变电站设备的功能和保管服务有关,主要包括能源消耗成本、维护保养成本、人工成本、环境成本等。其中能源消耗成本指项目设备运行时所需要的能源消耗;维护保养成本是指项目设备的维护、检修、更换零部件等的费用;人工成本是指变电站运行管理所产生的费用;环境成本是指建立设备运行环境所需的费用。根据以上分析可知, C_v 的影响因素中人员因素构成了主要的不确定因素,致使维护保养、运行管理费用出现较大的变动。

3) 大修技改成本 C_f 的不确定影响因素。

C_f 分为大修成本和技术改造成本 2 部分。 C_f 属于非年度周期成本,它并不是每一年都会发生的成本。大修成本是为了维护设备的正常运行而必须采取的大的维修措施所产生的费用。技术改造成本则是由于引入先进的技术、设备、材料等对现有落后的生产设备及配套的辅助设施进行完善、更新改造产生的费用。这 2 部分成本都会受到环境或社会技术经济发展的影响,其不确定性很强,大修成本的发生是一个随机的概率事件,而技术改造成本的发生则是一种未确知的信息和灰信息,这使得在实际工作中很难准确估算出某一个确定的值来表示 C_f 。本文将引入盲数理论来解决这个问题。

4) 惩罚成本 C_m 的不确定影响因素。

C_m 是需求侧的缺电成本,是电网供电可靠性水平高低的直接经济体现,其大小与停运概率、停运持续时间、平均停用功率和停运后的维修成本有关。因此 C_m 可用以下公式进行计算:

$$C_m = \sum k\lambda(at_d + R_c T(R)) \quad (7)$$

式中: k 为故障率调节系数; λ 为设备年平均故障率; t_d 为设备年故障中断供电时间; a 为设备故障的单位时间成本,即用户平均供电中断成本,它与用户的性质、用户所在区域等因素有关; R_c 为设备故障平均修复成本; $T(R)$ 为设备的平均修复时间。在此根据电力设备发生故障的特点,引入 Weibull 分布函数,利用 Monte-Carlo 模拟法仿真变电设备的故障发生概率,经过多次的迭代计算,最终得到设备

在给定周期内的故障发生频率。

5) 设备残值 C_s 的不确定影响因素。

C_s 即剩余值, 是设备或者整个工程在分析周期期末的剩余价值。 C_s 不同于前面提到的其他成本, 它可以是正的成本, 也可以是负的价值。 C_s 的估算有很强的主观不确定性, 但是由于其所占总成本的比例较小, 所以经常被忽略不计或者以初始建设投资的百分比来估计。在此忽略其不确定性, 将其视为初始化建设成本的一个函数来估算。

通过以上分析可知, 变电站 LCC 的计算公式(6) 中将 C_v 、 C_f 和 C_m 都视为变电站运行时间 t 的函数, 这种表达方式是不准确的, 也不符合实际情况。因为 C_f 和 C_m 并不是每年都发生的, 其发生受到许多不确定因素的影响, 下面将盲数理论引入式(6)中, 并对其修正, 对成本分析中存在的确定信息进行合理处理。

2 盲数理论在变电站全寿命周期成本分析中的应用

2.1 盲数的概念

首先, 设 \mathbf{R} 为实数集, $\bar{\mathbf{R}}$ 为未确知有理数集, $G(I)$ 为区间型有理灰数集。若存在 $a_i \in G(I)$, $\alpha_i \in [0,1]$, $i=1,2,\dots,n$, $f(x)$ 为定义在 $G(I)$ 上的灰函数, 且有

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_i, & x = a_i (i=1,2,\dots,n) \\ 0, & x \notin \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \text{ 且 } x \in G(I) \end{cases}$$

若当 $i \neq j$ 时, $a_i \neq a_j$, 且 $\sum_i \alpha_i \leq 1$, 则称 $f(x)$ 是一个盲数,

$f(x)$ 的阶数是 n , 称 $\sum_i \alpha_i$ 为 $f(x)$ 的总信度, 称 α_i 为 $f(x)$ 在 a_i 点的可信度^[11-12]。1 阶未确知有理数

$$E(f(x)) = \begin{cases} \alpha, & x = \frac{1}{\alpha} \left(\odot \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \right) \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

为盲数 $f(x)$ 的均值。

由盲数和盲数均值的定义可以看出, 未确知有理数和区间型灰数都是盲数的特例, 盲数是随机变量、未确知数、模糊数学和灰数的扩展^[13-15]。盲数可以包含多种不确定性信息, 所以, 可借助盲数来研究盲信息的数学表达和数学处理。

2.2 变电站全寿命周期成本的盲数模型

要建立基于盲数理论的变电站工程 LCC 优化模型, 首先要综合考虑变电站建设和运行过程中各种

不确定性信息的属性和特点, 对盲信息做出合理的总体评判, 确定组成 LCC 的各项成本的盲数表达式。在众多的盲信息中, 有些可以通过对历史数据进行分析 and 整理, 由相应的数学方法直接得到其可能的取值或取值范围; 有些则需要由相关专家用语言、经验等来描述。

经过收集整理以往变电站工程的实际数据可以知道, 在实际变电站工程建设中, 初始建设成本 C_0 的估算方法和理论都已经很成熟, 因此 C_0 可以用 1 阶盲数 $C_0(x)$ 来表示; 残值 C_s 多采用初始建设成本的百分数来表示, 因此 C_s 的盲数表达式也是 1 阶的, 并可以表示成 $C_s(v) = rC_0(x)$, 其中 r 为残值占初始建设投资的百分比; 运行维护成本 C_v 与变电站寿命 T 相关, 并且是每年都要发生的连续费用, 因此可以用每年发生的成本 $c_v(y)$ 来表示; 而对于大修技改成本 C_f 和惩罚成本 C_m , 它们并不是每年都发生的, 为了更科学合理地表达, 引入了 2 个变量 f 和 n_m , 其中 f 表示变电站寿命期 T 中 C_f 发生的频率, n_m 表示 C_m 在全寿命周期中发生的次数。由此就可以得到各项成本的盲数表达式。

1) 初始建设成本。

$$C_0(x) = \sum_{i=0}^k \frac{c_{0i}(x)}{(1+i)^i} \quad (8)$$

2) 运行维护成本。

$$C_v(y) = \sum_{i=1}^T \frac{c_{vi}(y)}{(1+i)^i} \quad (9)$$

3) 大修技改成本。

$$C_f(z) = \sum_{i=1}^{T/f} \frac{c_{fi}(z)}{(1+i_f)^i} \quad (10)$$

式中 $i_f = (1+i)^{1/f} - 1$, 表示大修技改成本的实际折现率。

4) 惩罚成本。

$$C_m(q) = \sum_{i=1}^{n_m} \frac{c_{mi}(q)}{(1+i_m)^i} \quad (11)$$

式中: $i_m = (1+i)^{T/n_m}$, 表示惩罚成本的实际折现率。

5) 期末残值。

$$C_s(v) = \frac{rc_0(x)}{(1+i)^T} \quad (12)$$

将式(8)~(12)带入公式(6), 整理就得到变电站全寿命周期成本的盲数表达式

$$C_{LCC} = C_0(x) \left[1 - \frac{r}{(1+i)^T} \right] + C_v(y) + C_f(z) + C_m(q) \quad (13)$$

公式(13)就是基于盲数理论的变电站全寿命周

期成本的估算公式。其中，各项成本的具体盲数函数可以根据历史数据，采用定性专家预测方法得到。

3 算例分析

本文以某变电站工程为例，对其进行基于盲数的全寿命周期成本估算分析，首先收集以前变电站工程项目的历史数据，聘请相关专业专家对该项目各项成本进行定性预测。定性专家预测法的一般步骤为：

- 1) 确定预测对象，即某个变电站工程项目。
- 2) 收集每个专家对每项成本进行定性估算的判断区间。
- 3) 确定每个专家的估算权重，并根据具体算法得到专家的综合可信度。
- 4) 将成本的判断区间和专家综合可信度带入相应公式，确定各项的盲数表达式。

在本例中，通过专家定性预测，根据实际变电站工程项目评估预测和分析，得到：该变电站预计初始建设成本为 23 000~25 000 万元之间，建设期为 1 a，预计服役期限为 30 a，期末残值为为初始建设成本的 5%，大修技改频数预计为每 5 a 一次，经过 Monte-Carlo 模拟仿真得到变电站故障发生频率为 0.433 次/a，由此得到惩罚成本发生的次数为 $n_m=13$ 。根据 2006 年国家发改委、建设部发布的《建设项目经济评价方法与参数(第三版)》中对社会折现率的规定，设定基准折现率 $i=8\%$ 。

在此我们以运行维护成本的估算为例，现有 3 位专家对该变电站的运行维护成本进行定性估计，结果如下：

- 1) 专家 A 估计该变电站每年的运行维护成本为 1 900~2 000 万元，估计有 60%的把握。
- 2) 专家 B 估计该变电站每年的运行维护成本为 2 000~2 200 万元，估计有 80%的把握。
- 3) 专家 C 估计该变电站每年的运行维护成本为 2 200~2 500 万元，估计有 60%的把握。

首先根据 3 位专家的权威性，给出 3 位专家的权重为 0.5、1.62、0.67，再由各专家的估算把握，可以得到专家 A、B、C 的综合可信度分别为

$$\alpha_1 = \frac{60}{60+80+60} \times 0.5 = 0.15$$

$$\alpha_2 = \frac{80}{60+80+60} \times 1.62 = 0.65$$

$$\alpha_3 = \frac{60}{60+80+60} \times 0.67 = 0.2$$

由此得到该变电站每年的运行维护成本的盲数表达式，即

$$c_{vr}(y) = \begin{cases} 0.15, & y = [1\ 900, 2\ 000] \\ 0.65, & y = [2\ 000, 2\ 200] \\ 0.2, & y = [2\ 200, 2\ 500] \end{cases}$$

同理，可以得到初始化建设成本、平均大修技改成本、平均惩罚成本的盲数表达式：

$$c_{or}(x) = \begin{cases} 1, & x = [23\ 000, 25\ 000] \\ 0, & x \notin [23\ 000, 25\ 000] \end{cases}$$

$$c_{fr}(z) = \begin{cases} 0.25, & z = [680, 700] \\ 0.65, & z = [700, 720] \\ 0.1, & z = [720, 740] \end{cases}$$

$$c_{mr}(q) = \begin{cases} 0.23, & q = [500, 520] \\ 0.55, & q = [520, 540] \\ 0.22, & q = [540, 600] \end{cases}$$

将以上各式带入全寿命周期盲数成本计算公式，得到

$$C_{(LCC)} = C_o(x) \left[1 - \frac{5\%}{(1+8\%)^{30}} \right] + \sum_{t=1}^{30} \left[\frac{c_v(y)}{(1+8\%)^t} \right] + \sum_{t=1}^6 \left[\frac{c_{fr}(z)}{(1+i_f)^t} \right] + \sum_{t=1}^{13} \left[\frac{c_m(q)}{(1+i_m)^t} \right]$$

利用 BLCC5.0 软件，便可以得到一个 54 阶的变电站全寿命周期盲数表达式，由于该式过于复杂，并且取值区间有重合现象，因此需要对初始结果进行整理合并，整理后得到下面的结果表达式：

$$C_{(LCC)} = \begin{cases} 0.127\ 32, & x = [42\ 430, 45\ 070] \\ 0.294\ 57, & x = [45\ 070, 47\ 995] \\ 0.385\ 39, & x = [47\ 995, 49\ 990] \\ 0.187\ 41, & x = [49\ 990, 54\ 855] \\ 0.005\ 31, & x = [54\ 855, 55\ 650] \end{cases}$$

代入盲数均值计算公式可得到均值为

$$E(C_{(LCC)}) = \begin{cases} 1, & x = 48\ 276.5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

即从盲数均值的角度来讲，该变电站的全寿命周期成本为 48 276.5 万元。

由以上结果可知，基于盲数理论的变电站全寿命周期成本估算不仅给出了盲数均值，而且给出了各个区间的可信度，而以前的确定型的估算算法只能给出一个总成本数值点，没有具体的可信度，实际应用中的参考价值不是很强。根据计算结果可以得出，该变电站全寿命周期成本不超过 50 000 万元的可信度为

$$P(C \leq 50\,000) = 0.127\,32 + 0.294\,57 + 0.385\,39 + \frac{50\,000 - 49\,990}{54\,855 - 49\,990} \times 0.187\,41 = 80.77\%$$

同理可得到成本小于均值 48 276.5 万元的可信度为 47.63%，可见本例中变电站 LCC 不超过 50 000 万元的可信度为 80.77%。这说明若对变电站的全寿命周期中发生的成本进行合理科学的管理，将总周期成本降到 50 000 万元以下的可能性是非常大的。

4 结论

本文针对变电站工程 LCC 管理中存在许多不确定性因素的特点，将盲数理论引入到变电站 LCC 估算模型中，充分考虑了盲信息对于成本估算结果的影响，不但可以得出变电站 LCC 的可能分布区间，还可以得出各个区间的可信度，这使得估算结果更加合理可信，也更具有实用价值。

将盲数概念引入到确定性模型中有着很好的应用前景，但是由于盲数的计算过程比较繁琐，当系统规模较大时，所得的盲数结果的阶数增长速度非常快，这会导致计算速度下降，计算时间增加。因此，如何提高盲数的解算速度，解决实际问题中存在的确定性信息，是以后研究的重点。

参考文献

- [1] 王绵斌, 谭忠富, 曹福成, 等. 考虑不确定性因素的需求侧管理成本效益分析模型[J]. 电网技术, 2006, 30(14): 59-63.
Wang Mianbin, Tan Zhongfu, Cao Fucheng, et al. Cost-benefit analysis models for DSM project considering uncertain factors [J]. Power System Technology, 2006, 30(14): 59-63(in Chinese).
- [2] 郎斌. 变电站设备全寿命周期成本优化模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [3] 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(in Chinese).
- [4] 孟祥星, 韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 30-34.
Meng Xiangxing, Han Xueshan. Discussion on reserve caused by uncertain factors[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 30-34(in Chinese).
- [5] 吴奕亮. 寿命周期费用技术及其应用要点[J]. 上海电力, 2004(4): 273-279.
Wu Yiliang. Life cycle cost techniques and main points in application[J]. Shanghai Electric Power, 2004(4): 273-279(in

- Chinese).
- [6] 刘钧, 马志伟, 杨孝森, 等. 北京城北 500 kV 变电站工程施工项目管理分析[J]. 电力建设, 2006, 27(11): 14-18.
Liu Jun, Ma Zhiwei, Yang Xiaosen, et al. Analysis on project management of North Beijing 500 kV substation construction [J]. Electric Power Construction, 2006, 27(11): 14-18(in Chinese).
- [7] 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(in Chinese).
- [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.
Hi 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(in Chinese).
- [9] 王志勇, 郑海, 杨卫星. 基于 IEC61850 标准的 500kV 兰溪数字化变电站建设[J]. 电力建设, 2009, 30(10): 30-33.
Wang Zhiyong, Zheng Hai, Yang Weixing. Practice of building 500 kV Lanxi digital substation based on IEC 61850[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(10): 30-33(in Chinese).
- [10] 吴添祖, 冯勤, 欧阳仲健. 技术经济学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 50-337.
- [11] 李振宇, 徐蓉, 尚斌, 等. 数字化变电站建设中的难点与对策[J]. 电力建设, 2008, 29(8): 11.
Li Zhenyu, Xu Rong, Shang Bin, et al. Challenges in digitized substation construction and its countermeasures[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(8): 11(in Chinese).
- [12] 赵庭红. 盲数的 BM 模型在经济管理中的应用[J]. 商业研究, 2004(3): 35.
Zhao Tinghong. On the application of the blind model (BM) of unascertained number in economic management[J]. Commercial Research, 2004(3): 35(in Chinese).
- [13] 侯建设, 吴辉. 南阳西 500 kV 变电站工程施工质量管理[J]. 电力建设, 2009, 30(9): 91-93.
Hou Jianshe, Wu Hui. Quality control of construction project in Nanyang West 500 kV substation[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(9): 91-93(in Chinese).
- [14] 王光远. 未确知信息及其数学处理[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1990, 23(4): 1-10.
Wang Guangyuan. Unascertained information and its mathematical treatment[J]. Journal of Harbin University of Architecture And Engineering, 1990, 23(4): 1-10(in Chinese).
- [15] 刘开第, 吴和琴, 庞颜军, 等. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 160-176.



路石俊

收稿日期: 2009-11-24.

作者简介:

路石俊(1967—), 男, 博士研究生, 从事电力系统规划及电力技术经济的研究工作;

李翔(1949—), 男, 教授, 从事电力市场营销领域的研究工作, E-mail: lxcbj@126.com.

(责任编辑 李兰欣)