

层次分析法在城市电网入地改造中的应用

董智¹, 韩明光², 许长青¹, 黄殿勋¹, 王小林³

(1. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007; 2. 山西省祁县供电支公司, 山西 祁县 030900;

3. 河南省获嘉县安达电器有限公司, 河南 获嘉 453800)

摘要: 随着城市电网的发展, 城市电网入地改造工程面临着一个复杂的决策问题, 即如何合理安排各对象的改造顺序。针对这一问题, 首次提出了城市电网入地改造的层次分析法决策方法, 该方法较全面地考虑了各种必要因素, 对城市电网入地改造的对象进行综合评判, 从而确定其改造的优先顺序, 为工程决策提供可靠依据。以郑州市区某城网架空线入地改造工程为算例, 所得到的评判结果与工程的实际要求非常吻合。因此, 该方法灵活有效, 具有较好的应用价值。

关键词: 城市电网; 入地改造; 层次分析法; 判断矩阵; 综合评判

中图分类号: TM71 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2006)22-0064-05

0 引言

城市电网是城市内为城市供电的各级电压网络的总称, 是电力系统的主要负荷中心, 也是城市现代化建设的重要基础设施。由于历史原因, 我国城市电网架空线比较凌乱, 这不仅造成视觉污染, 影响城市的环境, 而且带来了很大的安全隐患。世界上许多发达国家都把城市电网架空线入地(电力电缆化)的普及率作为衡量城市现代化程度的重要标志。城市电网架空线入地改造, 不仅可以美化市容, 而且能够充分利用地下空间资源, 使线路运行更加安全可靠。党的十六届五中全会发出了建设“资源节约型、环境友好型”社会的号召。按照这一号召, 各地将更加重视城网架空线的入地改造工作, 城网大规模入地改造也将势必陆续展开。

然而, 如此大规模的架空线入地改造面临着复杂的决策问题, 即对于众多的待改造架空线路, 如何决定它们入地改造的先后顺序, 以保证充分利用有限的资金, 合理配置有限的资源。本文提出将层次分析法应用于城市电网架空线入地改造的决策中。层次分析法对各待改造对象进行综合评判, 得到合理的改造顺序, 为改造工程提供了有力的依据。郑州市区某城网架空线入地改造工程证明了该方法的有效性和可行性。

1 层次分析法

层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 是 1971 年由美国匹兹堡大学教授、著名运筹学家萨迪提出的一种实用的多准则决策方法^[1,2], 其思想是

通过建立清晰的层次结构来分解复杂问题。在此过程中, 运用两两比较的方法, 用相对标度将各种属性标量化, 逐层建立判断矩阵, 并求得局部权重, 最后计算各方案在总目标下的综合权重, 从而确定其优先顺序。层次分析法是系统工程中对非定量事件作定量分析的一种简便方法, 它以系统性、灵活性、实用性等特点, 适合于多因素的复杂系统的决策。层次分析法的应用步骤如下。

1.1 建立层次结构模型

基于层次分析法的综合评判决策首先建立决策问题的层次结构 (Hierarchy)。层次结构是层次分析法综合评判决策中把复杂问题分解和简化的关键。一般情况下, 层次结构分为目标层、指标层 (又称属性层) 和方案层三部分, 其中指标层根据问题的复杂程度可由多层构成。

1.2 标量化形成判断矩阵

所谓标量化, 指通过一定的标度体系将各种原始数据转换为可直接比较的规范化格式。这些原始数据包含定性和定量两类数据, 都需要规范化后才能比较。对于定量数据, 可由数据直接比较形成判断矩阵; 对于定性数据, 则须引入一种标度进行标量化, 再构造判断矩阵。一般常采用 1-9 标度作为定性数据的标量化方法^[3]。1-9 标度法适用于那些信息资料不充分而又希望依据两两比较来做出合乎逻辑的判断的决策问题。

1.3 判断矩阵的一致性检验

在专家两两比较判断的过程中, 若比较量超过两个, 就可能出现不一致的判断。

检验判断矩阵的一致性时, 可采用随机一致性

指标 (CR)来衡量^[4]。设有 $n \times n$ 的 1-9 标度互反性判断矩阵,随机一致性指标 CR 的计算方法如下:

- 1) 计算判断矩阵的最大特征根 λ_{max} ;
- 2) 按照 $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$, 计算一致性指标 CI , 其中, n 为矩阵阶数;
- 3) 根据矩阵阶数 n , 从表 1 查到相应的平均随机一致性指标 RI ;
- 4) 计算随机一致性指标 CR :

$$CR = CI / RI$$

当 CR 小于 0.1 时, 认为判断矩阵具有满意的一致性; 当 CR 大于等于 0.1 时, 认为判断矩阵不具有满意的一致性。对于不满足一致性要求的判断矩阵, 需要采用适当方法对该矩阵进行处理和调整, 或者重新构造判断矩阵。

表 1 平均随机一致性指标 RI

Tab 1 Average stochastic consistency index RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

1.4 判断矩阵权重求解

对于 1-9 标度互反性判断矩阵, 采用特征向量法^[5]来求解其最大特征值及其对应的特征向量。在特征向量法中, 矩阵最大特征根对应的归一化特征向量即为各评判对象的相对权重。

1.5 各方案综合权重计算和排序

设各指标对于总目标的重要程度的权重为 q , 又将每个指标下各方案的相对权重作为列向量组成矩阵 \tilde{p} , 则各方案对于总目标的综合权重 W 由式 (1) 求得:

$$W = \tilde{p} \times q \quad (1)$$

2 层次分析法在城市电网入地改造控制中的应用

城市电网架空线入地改造的思路是按各变电站供电范围分别实施, 即先将整个城市电网以各变电站 (指 35 kV 和 110 kV) 的供电区域进行分区, 然后在各变电站供电区域内分别制订 10 kV 架空线入地改造的方案。在一个变电站供电区域内, 应用层次分析法评判过程如下。

2.1 第一步: 确定变电站供电区域内各功能区的改造顺序

由于变电站在正常供电时, 一般是开环运行、辐射式供电。按照城市功能把变电站的供电区域分成几片小的扇形区域, 这就是所谓的功能区。对这些功能区, 用层次分析法从城市建设、城市环境、电网

结构以及可靠性、经济性等指标评判改造的先后顺序。

- 1) 建立变电站供电区域内各功能区评判的层次分析模型, 如图 1 所示。

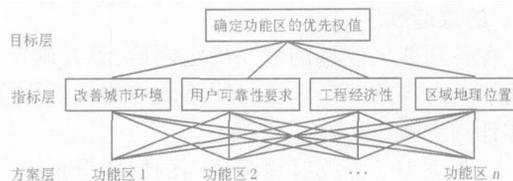


图 1 一个变电站供电区域内各功能区评判的层次分析模型

Fig 1 AHP judgment model of each function area in a transformer substation range

“改善城市环境”是指架空线入地改造对美化城市环境的作用。“用户可靠性要求”是指入地改造对提高配电网供电能力和供电可靠性的作用, 负荷密度大的功能区的可靠性要求高。“工程经济性”, 这里是指该功能区线路全部改造的费用。因为架空线入地改造工程涉及的费用巨大, 因此决策时的目标之一是尽量减少投入的资金总量。而根据施工经验发现, 越短的线路, 其“经济性”也就越好。“区域地理位置”是指该区域在城市中所处的地理位置, 一般说来, 优先改造的顺序为内环、中环和外环。

2) 指标层中各个指标相对权重的计算

在功能区评价的层次分析模型中, 对于总目标而言, 四个指标的重要程度是不同的。因此, 首先要对这四个指标的相对重要性进行评判, 确定它们的相对权重。这四个指标的相对重要性属于定性数据, 需根据决策者的经验来判断。采用 1-9 标度构造判断矩阵, 用特征向量法求其最大特征根及对应的归一化特征向量, 并进行一致性检验。

3) 方案层中各功能区分别在四个指标下相对权重的计算

四个指标中包含定性指标和定量指标。因此, 要采用不同的方法构造判断矩阵。“改善城市环境”是定性指标, 可根据 1-9 标度对各个功能区进行评判。“用户可靠性要求”可通过各功能区的负荷密度来标度, 属定量指标, 用功能区的负荷密度两两比较形成判断矩阵。“工程经济性”可由各功能区内待改造的 10 kV 线路总长度的倒数来标度, 属定量指标, 直接用这些倒数两两比较形成判断矩阵。“区域地理位置”是定性指标, 根据 1-9 标度构造判断矩阵。所有判断矩阵构造完毕, 即可用特征向量法求得它们在各指标下的相对权重。

4)各功能区在总目标下的综合权重计算

按照公式(1),求取各功能区在总目标下的综合权重,确定它们的改造顺序。

2.2 第二步:确定每个功能区内各 10 kV 放射线路的改造顺序

在各功能区改造的顺序确定之后,就要确定每个功能区内各条 10 kV 放射线路改造的先后顺序,具体评判步骤如下。

1)建立 10 kV 放射线路评判的层次分析模型,如图 2 所示。

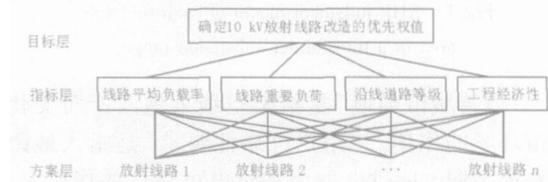


图 2 一个功能区内各 10 kV 放射线路评判的层次分析模型

Fig 2 AHP judgment model of each 10 kV radial line in one function area

在这四个指标中,“线路平均负载率”是指线路上实际负荷与线路承载的额定容量的比值,负载率高的线路应优先改造;“线路重要负荷”是指该线路上所承载的重要负荷情况;“沿线道路等级”是指整条放射线路经过的景观道路和交通干道情况;“工程经济性”是指放射线路改造的投资大小,长度越短的线路,其“经济性”越好。

2)指标层中各指标相对权重的计算

对该模型中的四个指标的相对重要性进行评判,具体方法与第一步中相同。

3)方案层中各 10 kV 放射线路在各指标下相对权重的计算

“线路平均负载率”是定量指标,其判断矩阵用线路的平均负载率两两比较来构造。“线路重要负荷”是定性指标,通过 1-9 标度来构造。“沿线道路等级”是定性指标,也通过 1-9 标度来构造。“工程经济性”用放射线路长度的倒数来度量,属定量指标,直接用每条放射线路长度的倒数的两两比较来构造判断矩阵。

4)方案层中各放射线路在总目标下的综合权重计算

按照公式(1)求得各放射线路在总目标下的综合权重。

分别在各功能区内对 10 kV 放射线路进行排序,从而得到整个变电站供电区域内所有架空线入地改造的合理顺序。

3 算例分析

3.1 第一步:确定变电站供电范围内各功能区的改造顺序

1)建立该变电站供电区域内各个功能区评判的层次分析模型

郑州市区某变电站 10 kV 配电放射线路为 19 条,坐落在市区的中南部,供电区域有十余平方公里,其间坐落有市政机关、商场、大型工厂、公园、绿化带、居民住宅区等。因此,按照城市功能,可大致将该站供电区域划分为五个功能区域:A 区为工业区,B 区为商业区,C 区为市政区,D 区为风景区,E 区为居民住宅区,如图 3 所示。

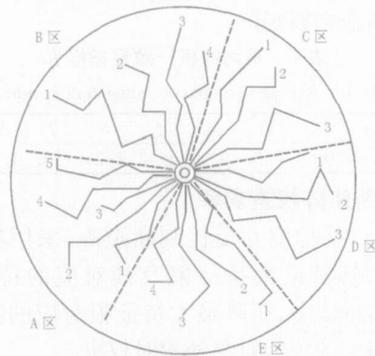


图 3 郑州市区某变电站内各功能区的划分示意图

Fig 3 Sketch map of function areas in some transformer substation of Zhengzhou city

对该变电站所划分的五个功能区,建立如图 1 所示的层次结构模型。

2)准则层中各个准则相对权重的计算

根据 1-9 标度构造判断矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

用 Matlab 软件计算该判断矩阵的最大特征根及其对应的归一化特征向量。最大特征根 $\lambda_{\max} = 4.0458$, λ_{\max} 对应的归一化特征向量为

$$d_1 = [0.2561, 0.4716, 0.1645, 0.1078]$$

矩阵的随机平均一致性指标 $CR = CI/RI = \frac{\lambda_{\max} - n}{RI \times (n - 1)} = \frac{4.0458 - 4}{0.9 \times (4 - 1)} = 0.0170 < 0.1$, 所以矩阵具有满意的一致性。

3)方案层中各功能区在四个指标下相对权重的计算

在“改善城市环境 指标下,五个功能区评判的

1-9标度判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/3 & 1/5 & 1/2 \\ 4 & 1 & 2 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1/2 & 1 & 1/3 & 2 \\ 5 & 3 & 3 & 1 & 4 \\ 2 & 1/3 & 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵的随机一致性指标 CR 值为 $0.0284 < 0.1$, 满足一致性要求。矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = 5.1271$, 其对应的归一化特征向量为

$$V_1 = [0.0604, 0.2388, 0.1551, 0.4511, 0.0946]$$

在“用户可靠性要求 指标下,由五个功能区平均负荷密度两两比较构造的判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1042/1266 & 8.56/1266 & 7.83/1266 & 1020/1266 \\ 1266/1042 & 1 & 8.56/1042 & 7.83/1042 & 1020/1042 \\ 1266/8.56 & 1042/8.56 & 1 & 7.83/8.56 & 1042/8.56 \\ 1266/7.83 & 1042/7.83 & 8.56/7.83 & 1 & 1020/7.83 \\ 1266/1020 & 1042/1020 & 8.56/1020 & 7.83/1020 & 1 \end{bmatrix}$$

该矩阵的特征值为 5,特征值对应的归一化的特征向量为

$$V_2 = [0.1526, 0.1854, 0.2257, 0.2468, 0.1895]$$

在“工程经济性 指标下,五个功能区的 10 kV 放射线路总长度的倒数两两比较所构造的判断矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/11.03 & 1/8.04 & 1/9.27 & 1/10.79 \\ & 1/12.15 & 1/12.15 & 1/12.15 & 1/12.15 \\ 1/12.15 & 1 & 1/8.04 & 1/9.27 & 1/10.79 \\ 1/11.03 & & 1 & 1/11.03 & 1/11.03 \\ 1/12.15 & 1/11.03 & & 1/9.27 & 1/10.79 \\ 1/8.04 & 1/8.04 & & 1 & 1/8.04 \\ 1/12.15 & 1/11.03 & 1/8.04 & & 1/10.79 \\ 1/9.27 & 1/9.27 & 1/9.27 & 1 & 1/9.27 \\ 1/12.15 & 1/11.03 & 1/8.04 & 1/9.27 & 1 \\ 1/10.79 & 1/10.79 & 1/10.79 & 1/10.79 & 1 \end{bmatrix}$$

该矩阵的特征值为 5,特征值对应的归一化的

表 2 各功能区内 10 kV 放射线路的评判结果

Tab 2 Judgement result of 10 kV radial line in each function area

功能区名称	功能区内依次放射线路的相对权重	各放射线路的改造顺序
D区	[0.288 0, 0.319 8, 0.392 2]	D ₃ , D ₂ , D ₁
C区	[0.323 8, 0.365 6, 0.310 6]	C ₂ , C ₁ , C ₃
B区	[0.183 5, 0.312 6, 0.282 7, 0.221 2]	B ₂ , B ₃ , B ₄ , B ₁
E区	[0.218 2, 0.256 2, 0.282 6, 0.243 0]	E ₃ , E ₂ , E ₄ , E ₁
A区	[0.214 6, 0.229 0, 0.207 7, 0.180 8, 0.167 9]	A ₂ , A ₁ , A ₃ , A ₄ , A ₅

从线路的长度情况看,功能区域内的线路总长度由短到长依次为 C区、D区、E区、B区和 A区。

特征向量为

$$V_3 = [0.1696, 0.1829, 0.2402, 0.2239, 0.1834]$$

在“区域地理位置 指标下,构造的 1-9标度判断矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 & 2 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

计算 CR 值为 $0.0182 < 0.1$, 满足一致性要求。 λ_{\max} 对应的归一化特征向量为

$$V_4 = [0.1464, 0.3236, 0.2756, 0.0974, 0.1570]$$

4)各功能区在总目标下的综合权重计算

五个功能区在总目标下的综合权重为

$$W = p \times q =$$

$$\begin{bmatrix} 0.0604 & 0.1526 & 0.1696 & 0.1464 \\ 0.2388 & 0.1854 & 0.1829 & 0.3236 \\ 0.1551 & 0.2257 & 0.2402 & 0.2756 \\ 0.4511 & 0.2468 & 0.2239 & 0.0974 \\ 0.0946 & 0.1895 & 0.1834 & 0.1570 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.256 \\ 0.4716 \\ 0.1645 \\ 0.1078 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1311 \\ 0.2136 \\ 0.2153 \\ 0.2793 \\ 0.1607 \end{bmatrix}$$

在综合权重向量 w 中,数值越大,对应的功能区域改造的优先权越大。因此,这五个功能区域进行改造的先后顺序为 D区、C区、B区、E区、A区。

3.2 第二步:确定每个功能区内各 10 kV 放射线路的改造顺序

在每个功能区内,对其中的 10 kV 放射线路进行综合评判,计算过程与各功能区的评判过程类似。由于篇幅关系,这里直接给出每个功能区内各 10 kV 放射线路的评判结果,如表 2所示。

按照前述的工程经济性评价策略,这基本上应是五功能区改造的先后顺序。但是,结合了改善城市环

境、负荷可靠性要求、区域地理位置等因素后,由于D区内有公园等景点,其对环境的要求甚高,B区为商业区,其对供电的可靠性要求很高,因此,这两个区的优先权应该得到提高。

而通过本方法进行评判,得到的最终评判结果为:D区、C区、B区、E区、A区。从这一结果可看到,D区与B区改造的优先级确实得到了提高,这与工程实际要求较为吻合。同样,在每个功能区内,各放射线路改造顺序的评判结果也呈现类似的特点。可见,层次分析法能够根据工程的具体需求,较全面地考虑各种必要因素,体现了层次分析法综合评判的优势。

4 结论

将层次分析法应用于城市电网架空线入地改造决策中,该方法全面考虑各种必要因素,有效地处理定性指标和定量指标的关系,得到各改造对象的先后顺序,为改造工程提供可靠的决策依据。以郑州市区某城网架空线入地改造工程为例,算例结果有效可行,对改造工程起到了较好的指导作用。

参考文献:

- [1] Satty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [2] 许树柏. 层次分析法原理 [M]. 天津:天津大学出版社, 1988.

- XU Shu-bai Principle of the Analytic Hierarchy Process [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988.
- [3] 徐泽水. AHP中两类标度的关系研究 [J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(7): 97-101.
- XU Ze-shui Study on the Relation Between Two Classes of Scales in AHP [J]. System Engineer Theory and Practice, 1999, 19(7): 97-101.
- [4] 王斌,常显奇,陈浩光. AHP方法中关于判断矩阵一致性的研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 19(5): 48-52.
- WANG Bin, CHANG Xian-qi, CHEN Hao-guang Study on Consistency of Judgement Matrix in Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2002, 19(5): 48-52.
- [5] 赵焕臣,许树柏,和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法 [M]. 北京:科学出版社, 1986.
- ZHAO Huan-chen, XU Shu-bai, HUO Jin-sheng Analytic Hierarchy Process A New Simple Decision-making Method [M]. Beijing: Science Press, 1986.

收稿日期: 2006-04-12; 修回日期: 2006-05-12

作者简介:

董智(1979-),男,硕士,从事电网规划及调度自动化方向的研究和设计工作; E-mail: wutiantju@163.com

韩明光(1964-),男,本科,工程师,从事输变电设备的运行、检修等工作;

许长青(1973-),男,本科,高级工程师,从事电网规划及调度自动化方向的研究和设计工作。

Application of the analytic hierarchy process in buried rebuilding of urban electrical network

DONG Zh¹, HAN Ming-guang², XU Chang-qing¹, HUANG Dian-xun¹, WANG Xiao-lin³

(1. Henan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450007, China; 2. Qixian Power Supply Company of Shanxi Province, Qixian 030900, China; 3. Henan Huojia ANDA Electrical Co., Ltd, Huojia 453800, China)

Abstract: With the development of urban electrical network, its buried rebuilding projects are faced with a complicated judgment problem about how to arrange the rebuilding sequence of every object rationally. In allusion to the problem, this paper firstly proposes the application of the Analytic Hierarchy Process in buried rebuilding of urban electrical network. The method can take many necessary factors into account overall, evaluate the rebuilding objects synthetically, ascertain the rebuilding sequence and provide reliable basis for project decision-making. Taking the project in one district of Zhengzhou City for example, its result accords with actual requirement. So the method is flexible and effective, and has a good application value.

Key words: urban electrical network; buried rebuilding; analytic hierarchy process; judgment Matrix; comprehensive judgment