

[输电线路]

基于层次分析法的架空输电线路状态评估

文/南京正浩电气科技有限公司 李立涅

提出基于输电线路监测的状态量和数据量，运用层次分析法及模糊综合评判，建立架空输电线路状态运行评估模型，为输电线路的高效智能运行提供支持。该评估方法能够较为准确地评估输电线路的运行状态，有效降低电网运行风险。

架空输电线路作为电能的重要传送通道，是电力网重要的组成部分。由于其常年暴露于室外，受天气、山体滑坡、地震和洪水等影响严重，因此对其进行实时状态监测与评估，及时发现潜在故障及异常状态，采取防范措施，对电力系统的安全可靠运行十分必要。

过去，对架空输电线路的状态评估往往依赖于输电线路检修维护过程中发现的故障的历史数据。近年来，随着在线监测技术的不断发展，国内外研究学者开发了各类架空输电线路在线监测系统。到目前为止，输电线路覆冰在线监测系统，绝缘子漏电电流在线监测，输电线路微风振动在线监测，导线舞动、弧垂在线监测及预警，输电线路防雷系统等已经广泛应用于电力输电系统。故，基于线路周期巡检结果，由人工建立的输电线路评估报告并不能适应输电线路在线监测系统的发展。因此，确立合理的架空输电线路在线监测评估方法是实现在线监测及故障诊断的核心。

层次分析法作为一种多目标综合评价方法，广泛应用于决策分析中。由于架空输电线路运行状态的影响因素复杂，且目前的在线分析技术发展不成熟，为了实现从离线评估模式向在线评估转变，需要使用输电线路监测状态量和数据量进行输电线路的状态综合评估。因此，本文提出一种应用层次分析法，基于在线监测得到的数据量及状态量评

估分析架空输电线路运行状态的方案。

改进层次分析法

1. 基本思想

层次分析法是一种将网络系统的概念与多目标综合评价的决策分析方法，由T. L. Saaty于1975年首次提出。该方法通过划分层次，将决策对象的影响因素按照重要性权重排序，将复杂的问题数字化，实现定量分析。运用该方法能够实现对结构复杂，影响因素繁多的多目标系统的准确、客观分析。

如图1所示为层次分析法的流程图。第一步建立递进层次结构。通过对架空输电线路实际问题的分析，将问题分解为若干个子要素，之后根据不同的属性分为准则层及方案层。准则层为决策对象的下一级，方案层为评价目标的具体影响因素。第二步构造专家评判矩阵。根据实际决策对象，采用评分的方式，从最底层的因素集逐级评判，构造因子对比矩阵，并对其进行重要性对比，得到具体数值的判断矩阵。第三步进行权向

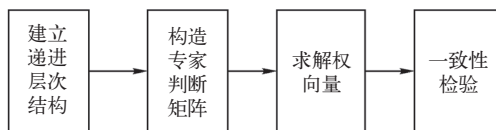


图1 层次分析法流程图

量求解, 求出每个矩阵的特征向量及特征值。最后进行一致性检验。若通过检验, 则第二步得到的结果即为标准权向量; 若未通过检验, 即需要构造新的判断矩阵, 重复上述第二三四步骤。

2. 计算过程

首先, 根据实际情况选择最终决策目标的关键评价准则。之后, 构造判断矩阵。判断矩阵的表达方式如下

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, n 为因素的个数, 该矩阵表示不同因素之间的相对重要度。按照不同重要程度划分为 0.1~0.9, 共 9 个等级。重要度评判的规则如表 1 所示。

表1 重要度分数等级

重要度	远小于	等于	远大于
等级分数	0.1	0.5	0.9

具体的数值选择需要根据实际对象进行专家评分, 两两对比判断相对重要性的大小。之后进行每个评价目标的因素集权值计算, 计算公式为

$$W_{ix} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n-1}{2}}{n(n-1)} \quad (2)$$

$$W_{ij} = W_{ix} - W_{jx} + 0.5 \quad (3)$$

之后进行各个评价目标的整体权值计算, 计算公式如下

$$W_{ix} = W_{yx} W_{iy} \quad (4)$$

得到不同的因素对评价的整体权值。最后进行一致性检验的公式如下

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} - W_{ij}| / n^2 \quad (5)$$

得到的 $C \leq 0.1$, 则说明通过一致性检验。

改进层次分析法在输电线路状态评估中的应用

1. 输电线路评估模型的建立

对于输电线路状态评估过程, 首先确定输电线路状态评估的准则层及方案层。本文选择容易监测的典型指标作为输电线路状态评估的指标, 包括杆塔、基础、导地线、绝缘子、金具、接地装置、附属装置及周围环境。对于准则层中的每一个指标, 均细分其影响因素。评价杆塔的情况需要考虑其腐蚀情况、主材弯曲情况、混凝土裂纹、构件是否松动及杆塔是否倾斜 5 种因素。评价基础部分需要考虑杆塔基础、是否开裂、设备基础和锈蚀情况 4 种因素。对于导地线需要考虑是否断线、短路和对地放电 3 种因素。对于绝缘子的情况需要考虑锈蚀、憎水、裂纹、自爆、闪络、倾斜和连接情况。对金具的考虑因素和绝缘子相同。接地的部分需要考虑接地电阻是否偏大、接地线是否外露或锈蚀。对于附属的装置, 例如杆塔的杆号牌、防鸟装置、在线监测装置的护栏及通信设备是否损坏。周围环境也是影响输电线路安全可靠性的因素, 例如交跨距离和通道环境。具体划分如图 2 所示。

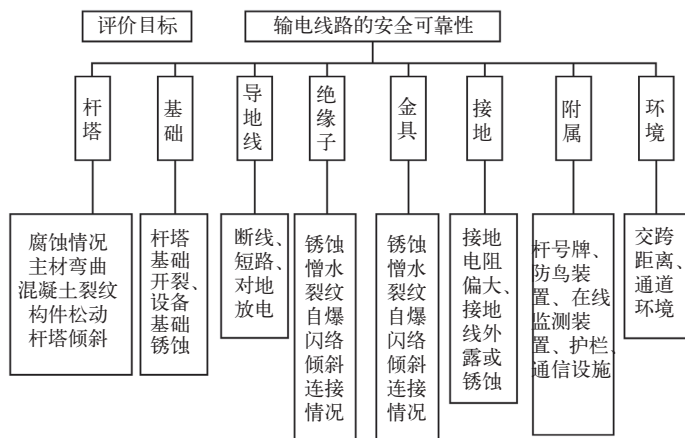


图2 输电线路评估指标模型

2. 输电线路模型的层次分析

依据图 2 所示模型, 将准则层对于评价目标的

比较矩阵记为 A 。对于本模型来说, A 矩阵为 8×8 阶矩阵, 其中的元素为方案对于准则的重要程

度,分为9个标度。根据实际情况,按照杆塔、基础、导地线、绝缘子、金具、接地、附属和环境的顺序模型建立的 A 如下式所示

$$A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.4 \\ 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.5 \\ 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.4 \\ 0.4 & 0.5 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.4 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.3 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0.4 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.3 \\ 0.5 & 0.6 & 0.5 & 0.6 & 0.6 & 0.7 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (6)$$

第二层的各个准则的因素对于准则层的判断矩阵也相应列出。本文以杆塔、基础和导地线为例进行计算说明,杆塔的矩阵包括腐蚀情况、主材弯曲情况、混凝土裂纹、构件是否松动及杆塔是否倾斜5个因素。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.65 & 0.75 & 0.75 & 0.55 \\ 0.35 & 0.50 & 0.55 & 0.55 & 0.45 \\ 0.25 & 0.45 & 0.50 & 0.50 & 0.35 \\ 0.25 & 0.45 & 0.50 & 0.50 & 0.35 \\ 0.45 & 0.55 & 0.65 & 0.65 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (7)$$

基础的矩阵包括杆塔基础、是否开裂、设备基础和锈蚀情况4种因素。

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.40 & 0.35 & 0.35 \\ 0.60 & 0.50 & 0.45 & 0.45 \\ 0.65 & 0.55 & 0.50 & 0.50 \\ 0.65 & 0.55 & 0.50 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (8)$$

导地线包括断线、短路和对地放电3部分。

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.45 & 0.45 \\ 0.55 & 0.50 & 0.50 \\ 0.55 & 0.50 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据上式(2)~式(4)计算不同的重要度的权值。

计算结果如表2~表4所示。

表2 杆塔的因素集相对权值

因素	腐蚀	弯曲	裂纹	松动	倾斜	W
腐蚀	0.50	0.65	0.75	0.75	0.55	0.235 0
弯曲	0.35	0.50	0.55	0.55	0.45	0.195 0
裂纹	0.25	0.45	0.50	0.50	0.35	0.177 5
松动	0.25	0.45	0.50	0.50	0.35	0.177 5
倾斜	0.45	0.55	0.65	0.65	0.50	0.215 0

表3 基础的因素集相对权值

因素	基础1	开裂	基础2	锈蚀	W
基础1	0.50	0.40	0.35	0.35	0.217
开裂	0.60	0.50	0.45	0.45	0.251
基础2	0.65	0.55	0.50	0.50	0.266
锈蚀	0.65	0.55	0.50	0.50	0.266

表4 导地线的因素集相对权值

因素	断线	短路	对地放电	W
断线	0.50	0.45	0.45	0.315
短路	0.55	0.50	0.50	0.342
对地放电	0.55	0.50	0.50	0.342

根据式(5)计算得到的一致性检验结果对于杆塔、基础和导地线分别为0.030 1、0.042和0.010,均小于0.1。因此以上3个矩阵满足可行性要求。同理,计算剩余5个矩阵,得到其相对权值。

在输电线路在线故障监测系统中,得到各个因素的权值是为了判断输电线路的状态,本文结合模糊综合评判法,根据上述利用层次分析法得到的各个因素子集的权重值,进行输电线路状态的综合评判。

算例分析

将某地500 kV架空输电线路作为研究对象,按照输电线路状态评估指标进行数据提取。得到的数据如表5所示。

表5 杆塔故障特性

杆塔号	故障特征	数据
15#	金具磨损	磨损后机械强度为原来的84%
38#	玻璃绝缘子自爆	上相绝缘子串第6片自爆
	弯曲度	主材弯曲0.24%
	缺失和松动	5%的螺栓缺失或松动

对于上述杆塔的情况,按照层次分析法中的权重值,进行故障特征的对应特征量的计算,计算结果如表6所示。

表6 杆塔故障特性特征量

杆塔号	故障特征	对应特征量的故障概率
15#	金具磨损	0.793 9
38#	玻璃绝缘子自爆	0.24
	弯曲度	0.146 4
	缺失和松动	0.166 7

结合可靠度运算公式

$$P = 1 - \sum_{j=1}^8 P_j W_j \quad (10)$$

得到该算例的结果,如表7所示。

表7 各杆塔的可靠度

杆塔号	可靠度
15#	0.985 2
38#	0.965 4

结束语

本文提出基于层次分析法的输电线路状态评估方法,经过实例计算,该方法可以准确考察架空输电线路的运行状态,为输电线路在线监测的稳定性提供了保障,对输电线路故障甄别和及时诊断具有一定的指导意义。EA

(收稿日期:2019.07.16)

(编辑:朱金凤)