

# 基于模糊理论的电缆故障风险评估模型

梁敏, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 在电力电缆预防性试验、运行状态在线监测、运行环境统计数据的基础上,应用模糊理论的方法确定各指标的隶属度,计算合适的权重,将这些分散指标的状态利用模糊综合评判法进行综合,结果反映了电缆综合运行状态。将不同等级的运行情况赋值量化,计算得到电缆整体风险值,构建了能够反应电缆整体故障风险大小的评估模型。对一定区域内多条电缆风险状态进行评估,并将评估结果进行量化排序,可以使管理与维护人员了解一段时间内哪些电缆最易发生故障,以便于合理地分配对多条电缆的监控力度,对故障可能性更高的电缆给予更高的关注度。

**关键词:** 电力电缆; 模糊综合评判; 故障风险

**Abstract:** Based on the statistical data of preventive experiments, on-line monitoring of operating condition and runtime environment, fuzzy theory is used to confirm the relative degree of each target and calculate the weighting factor. And then these targets are synthesized by fuzzy comprehensive evaluation, the results reflect the comprehensive operating condition of cables. The operating condition with different risk grade is assigned to calculate the overall value at risk for cables, and the evaluation model is established to reflect the overall risk level of cable. The risk condition of several cables in a certain area are evaluated, and the evaluation results are qualified and ranked for the management and maintenance staff to know which cables are more prone to failure, so that they can give more attention to the cables with higher failure probability.

**Key words:** power cable; fuzzy comprehensive evaluation; failure risk

中图分类号: TM247 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)06-05-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.06.002

## 0 引言

随着中国经济建设和科学技术的快速发展,电力电缆的投运越来越广泛,数量也逐年增长;但是,电力电缆多埋于地下,一旦发生故障,寻找起来十分困难,往往要花费数小时甚至几天,浪费了大量的人力财力,同时会造成难以估计的停电损失,因此如何准确、迅速、经济地预估、查寻、排除电缆故障,保证电网的安全运行,成为电缆使用中最重要的工作。

目前电缆故障诊断发展方向是主动对电缆绝缘状态进行在线监测,分析绝缘老化情况,提前发现电缆线路故障隐患,在准确检测基础上,实现电缆的预防性维修过渡至预知性维修。以电缆的状态监测为基础,综合各种测量值,电缆运行环境的统计量,对电缆整体的运行状况及其风险值进行评估;并对多条电缆进行风险排序,便于供电部门更好分配监测力度,科学、准确、安全、经济地做好状态维修,减

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51037003)

少电缆故障导致的停电停产,提高电缆线路运行的安全度,保证供电系统的可靠性,具有良好的社会效益。

## 1 电缆故障的原因及指标

造成电力电缆故障发生往往是由多个因素共同作用下的结果<sup>[1-2]</sup>;如果不能及时处理,会导致电气事故频繁连锁发生,导致“多因果”的故障出现,带来无法估计的损害,因此分析电缆故障产生的原因是故障预测和诊断必不可少的工作。结合电缆各类故障分析,导致故障的原因可分为以下4个方面:

### 1) 电缆本体的缺陷

引起电缆本体故障的主要原因有:受设计、制造、施工等影响导致的质量问题;选型不当,选取的电缆不满足运行的电压等级或载流量等;敷设过程中损伤;绝缘老化。

### 2) 电缆附件缺陷

电缆附件缺陷主要是指电缆接头引起的故障。引起接头故障的原因主要包括:接头生产质量缺陷、

工作人员安装缺陷、接头所在的电缆线路影响。

电缆本体以及接头质量的指标有电缆的生产厂商、质量等级和绝缘型号等,及其电缆本体绝缘老化的监测<sup>[3-5]</sup>参数,例如直流泄露电流  $I$ 、接地电容电流  $I_c$ 、介质损耗角正切  $\tan \delta$ 、绝缘电阻  $R_e$  等。同时也可以有效地利用使用年限、故障次数、维修记录等指标来预估电缆现在及未来一段时间内的运行情况和故障风险的大小。

### 3) 电网环境影响

电缆运行故障主要由电网实际运行条件引起,如电缆过负荷运行和过压运行。表示电网运行环境的指标主要有电网的负荷率  $L_d$ 、实际运行电压、过电压故障记录等。

### 4) 外部环境影响

外部环境主要包括外力破坏、通道环境的影响导致的电缆故障。外力破坏事故多发生在市政基础、绿化以及其他涉及地下的施工工程。通道环境的温度、湿度,是否靠近易燃、易爆物质等条件都是造成电缆故障的因素。

用于表征外部环境对电缆运行情况的影响指标有施工工地与电缆通道位置的水平净距离、进口安防等级、通道湿度等。

## 2 电缆故障风险模糊综合评估模型

### 2.1 综合评估模型的建立

当前主要的综合评估方法有层次分析法和熵值法<sup>[6]</sup>、基于灰色理论的评估法<sup>[7]</sup>、基于证据理论和模糊理论综合评估法<sup>[8]</sup>等。电缆故障风险模糊评估模型是根据模糊数学隶属度理论<sup>[9]</sup>把对电缆故障风险的定性分析转化为利用模糊数学对受到多种因素制约的事物或对象进行定量分析,做出一个总体的评价。它具有结果清晰、系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决。具体步骤如下:

1) 建立评价指标集。可以把城市地下电缆设施看作是一个多因素的集合,然后把能表明安全风险各种状况属性的对象全体  $i_1, i_2, \dots, i_n$  叫做评价指标集  $I$ ,记为

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \quad (1)$$

2) 建立评语集。按照电缆运行的风险状态可标记为“正常运行”、“低风险”、“中风险”、“高风险”4个风险等级<sup>[10]</sup>。评判模型的标语集表示为

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{\text{正常}, \text{低风险}, \text{中风险}, \text{高风险}\} \quad (2)$$

3) 由隶属函数确定地下电缆指标集元素与评语集之间的模糊评判矩阵。假设有  $m$  个评价指标,其评判矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & a_{m4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $a_{ij}$  表示指标集中第  $i$  个指标对评语  $u_j$  的隶属关系。

4) 确定评价因素权重向量  $W$ 。采用第2.3节的方法分析各个因素对城市地下电缆设施安全风险状况影响的大小,然后确定各个因素的权重分配。

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \quad (4)$$

5) 计算评判结果向量。考虑到电力电缆的运行状态是动态变化的,所有评判指标都对应综合评价有所贡献,因此选取加权平均型算子,计算公式为

$$b_j = \sum_{i=1}^m w_i a_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

综合评判模型为

$$B = W_R \cdot A_R \quad (6)$$

式中:  $b_j$  是对应评语  $u_i$  的评判结果;  $w_i$  是评判指标的权重系数;  $a_{ij}$  是评判指标的隶属度。这种模糊算子既保留了单个评判指标的全部信息,又突出了重要评判指标的影响程度,比较客观地反映了评价对象的全貌。

由上述内容可知,模糊评判模型最重要的两个工作就是由隶属函数求取模糊矩阵,及其求各因素集权重的问题。

6) 将评语集赋值量化。计算多条电缆风险值,根据风险值对电缆故障风险大小进行排序,由此确定不同电缆应给予的关注度。

### 2.2 模糊评判矩阵的确定

隶属函数是建立模糊评判矩阵的基础。为使隶属函数更贴近电缆运行的实际情况,综合了三角形隶属度函数和半梯形隶属度函数<sup>[11]</sup>实现多级隶属度的划分,形成对应于电力电缆4种运行状态的隶属度函数,如图1所示。

确定各指标对应于4种安全状态的模糊矩阵的步骤如下:

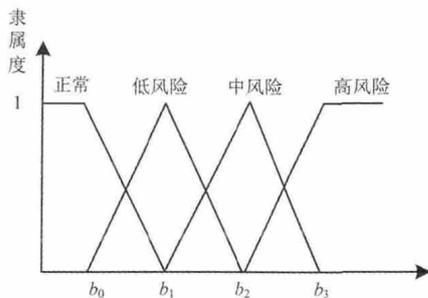


图1 隶属度函数

1) 根据预防性实验数据、电缆运行规程、运行人员或专家的经验,确定组合隶属函数中对应的4种状态的模糊界限。

2) 利用公式对电力电缆运行的系统各指标进行隶属度的计算。具体计算公式如下:

①偏小型

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (7)$$

②偏大型

$$f_2(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (8)$$

③中间型

$$f_3(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{c-b} & b < x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (9)$$

式中  $a, b, c$  为各种状态转化时的模糊界限值。

3) 由隶属函数建立各指标对应于4种状态的模糊矩阵。

2.3 评价因素权重的计算

1) 模糊层次分析法求权重的新方法

用模糊一致判断矩阵确定因素权重<sup>[12]</sup>的计算如公式(10)所示。

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{n\alpha} \sum_{k=1}^n r_{ik} \quad i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (10)$$

式中  $\alpha \geq (n-1)/2$  为调整参数。很明显在公式(10)中,当因素个数很多(即  $n$  取值很大)时,各因素的权重偏差会很小,只能确定方案的序关系,不能确定方案的权重大小,不利于分辨各因素对电缆整体的

影响性。基于此问题,采用了一种模糊层次分析法求权重的新方法<sup>[13]</sup>,计算公式如(11)所示。

$$w_i = \beta^{\frac{1}{n}} \sum_{j=1}^n r_{ij} / \sum_{k=1}^n \beta^{\frac{1}{n}} \sum_{j=1}^n r_{kj} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

参数  $\beta$  反映了决策者的分辨能力,要确定因素的权重,必须考虑参数  $\beta$  的选择。通过增大  $\beta$  的值可以提高因素优劣的分辨率;但是  $\beta$  很大时,某些权重值会趋向于0,不利于计算机处理,因此  $\beta$  是确定权重大小的关键。考虑到上述的两个影响,第3部分算例中采用的取值为  $\beta = e^5$ 。

2) 判断矩阵的建立

将传统的1-9标度方法<sup>[14]</sup>过渡到模糊层次分析法标度,令  $r_{ij}(\alpha) = \log_{\alpha} x_{ij} + 0.5$ ,式中  $x_{ij}$  表示1-9标度法得到的标度值,  $\alpha \geq 81$  以保证  $0 \leq r_{ij}(\alpha) \leq 1$ ,且  $r_{ji}(\alpha) + r_{ij}(\alpha) = 1$ ,则  $R = [r_{ij}(\alpha)]_{n \times n}$  是模糊互补判断矩阵。相应的各级模糊标度含义如表1所示。

表1 模糊层次分析法标度及含义

标度	含义
0.5	两个因素同等重要
$\log_{\alpha} 1 + 0.5$	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个稍微重要
$\log_{\alpha} 5 + 0.5$	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个明显重要
$\log_{\alpha} 7 + 0.5$	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个重要得多
$\log_{\alpha} 9 + 0.5$	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个极端重要
$\log_{\alpha} i + 0.5 \quad i = 2, 4, 6, 8$	上述两相邻判断的中值
$-\log_{\alpha} i + 0.5 \quad i = 1, 2, \dots, 9$	两因素反比较

以第3部分为例进行分析,算例中取用的指标分别有电缆的负荷率  $L_d$ 、空气湿度  $H_u$ 、施工工地与电缆通道水平净距离  $D$ 、反应水树枝老化程度的接地电流  $I_c$ 、有功损耗状态  $\text{tg}\delta$ 、电缆整体绝缘性能  $R_e$ 。它们对电缆故障的重要程度为:  $L_d = H_u < D < I_c < \text{tg}\delta < R_e$ 。由以上标度法构造判断矩阵,应用公式(11)即可求得个因素的权重  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。

3 算例分析

针对10 kV 高压 XLPE 电缆运行状况进行评估。表2给出了参考样本值,其中  $b_0, b_1, b_2, b_3$  的取值可以参考预防性试验、以往的绝缘判据以及专家经验综合确定。表3为 D1 ~ D5 实测样本。

表2 参考样本值

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$H_u / \%$	50%	60%	70%	80%
$L_d / \text{IN}$	0.6	0.7	0.85	1
$D / \text{m}$	2	1.5	1	0.5
$I_c / \text{mA}$	0	10	40	100
$\text{tg}\delta$	0	0.2	2	5
$R_c / \text{M}\Omega$	5 000	4 000	1 500	100

表3 实测样本

	$H_u$	$L_d$	$D$	$I_c$	$\text{tg}\delta$	$R_c$
D1	68	0.8	>5	1	0.1	4 300
D2	75	0.68	>5	65	1.3	2 000
D3	75	0.68	0.65	50	1.3	2 200
D4	90	0.75	>5	16	1.4	5 000
D5	80	0.9	>5	85	4.0	300

具体计算过程:

1) 由公式(7)~公式(9)确定电缆各指标的隶属情况得到模糊矩阵,以电缆D1为例。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.3333 & 0.6667 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2) 由表1确定模糊一致判断矩阵,取 $\alpha = 729$ ,两两因素比较后得到的矩阵如下。

$$R = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.2070 & 0.1458 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.2070 & 0.1458 & 0.1 \\ 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.2070 & 0.1458 \\ 0.7930 & 0.7930 & 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.2070 \\ 0.8542 & 0.8542 & 0.7930 & 0.7 & 0.5 & 0.3 \\ 0.9 & 0.9 & 0.8542 & 0.7930 & 0.7 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由公式(11)求得各因素的权重为 $W = (0.0393 \ 0.0393 \ 0.0856 \ 0.1418 \ 0.2558 \ 0.4382)$ 。

3) 由公式(5)计算评估结果为 $B_1 = w_i \cdot A_1 (0.4726 \ 0.4698 \ 0.0576 \ 0)$ 。

4) 重复以上步骤得到D2~D5的模糊评估结果如表4。

5) 评语集赋风险值<sup>[15]</sup>,风险等级越高,赋风险值越大。这里用{20, 40, 65, 95}代替评语集中的{正常, 低风险, 中风险, 高风险}进行赋值,将评判的结果转化为单一的风险值。经过计算,5条电缆的风险值分别为 $f_1 = 31.988$ 、 $f_2 = 57.6865$ 、 $f_3 = 61.4005$ 、 $f_4 = 36.9855$ 、 $f_5 = 82.295$ 。按风险值由大到小的排序为:

D5、D3、D2、D4、D1。

表4 电缆模糊评判结果

电缆	模糊评判结果
D1	(0.4726 0.4698 0.0576 0)
D2	(0.0934 0.2186 0.6092 0.0787)
D3	(0.0079 0.2536 0.6353 0.1032)
D4	(0.5238 0.2249 0.2120 0.0393)
D5	(0.0856 0.2095 0.7049)

分析故障风险排序结果可知,D5电缆故障风险值最高,故障可能性非常大,应予以更换。D2、D3两条电缆风险值中等,应做好检查和维护工作,避免进一步恶化。对比发现,两条电缆运行指标大致相同,甚至D3的某些指标优于D2;但由于D3电缆附近有市政工程施工,D3受外力破坏的可能性很大,所以故障风险值要高于D2,因此要加强对D3的监测与保护。D4与D1绝缘状况,运行环境均处于良好状态,故障风险较低;由于D4的运行环境较D1差很多,容易导致电缆绝缘受潮且老化,所以故障的风险值较D1稍高一些。

## 4 结 语

电缆运行状态的评价指标繁杂众多,每一指标反应电缆运行状态在时间、部位、深度均有所不同。应用的权重计算方法,通过适当调整 $\beta$ 提高因素的分辨率,确定不同因素的权重系数,通过综合评估模型,最终求得综合评估状态。

对于一定区域内的多条电缆,应用上述模型进行故障风险值预估,并对这些电缆的故障风险值进行排序。管理人员可根据风险排序的结果了解到未来一段时间内,哪些电缆最容易发生故障,并采取相应的措施。

### 参考文献

- [1] 王少华,叶自强,梅冰笑,等. 电力电缆故障原因及检测方法研究[J]. 电工电气,2011(5): 48-58.
- [2] 侯晓东. 电力电缆故障的原因分析及应对措施[J]. 内蒙古电力技术,2006(S3): 119-120.
- [3] 李红雷,张丽,李莉华. 交联聚乙烯电缆在线监测与检测[J]. 中国电力,2010,43(12): 31-34.
- [4] 朱宇川,赵斌,闫小军. 基于接地线电流法的电力电缆绝缘监测系统的设计[J]. 信息通信,2011(2): 120-121.

(下转第22页)

### 3 结 论

高压电缆附件作为电力电缆中运行设备,它的安全程度直接影响电力电缆的运行,从而影响到整个电力系统的运行。在阅读大量国内外的文献以及局部放电监测的有关资料后,设计了高压电缆附件局部放电在线监测系统,得到以下结论:

1) 设计了1套电缆附件局部放电在线监测系统,可实现对运行中的电缆附件因各种绝缘故障所产生的局部放电信号进行实时在线监测分析;

2) 采用小波去噪方法可去除局部放电信号中的窄带干扰信号、白噪声干扰信号和脉冲型干扰信号等干扰信号,并实现局部放电信号的时频综合分析;

3) 采用高频电流传感器作为局部放电信号检测原件可提高局部放电信号的检测灵敏度,并实现对高频局部放电信号的实时采集。

#### 参考文献

[1] 孙建锋,葛睿,郝力,等. 2010年国家电网安全运行情况[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 1-4.

[2] DL/T 596-1996, 电力设备预防性试验规程[S].

[3] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[4] 刘兵. 基于行波电力电缆故障单端在线测距研究

[5] 孙建涛,文习山,胡京,等. 高压XLPE电缆绝缘多参数在线监测[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 7-11.

[6] 刘杨,陈亚哲,李祥松,等. 基于层次分析法和熵值法的产品广义质量综合评估方法[J]. 中国工程机械学报, 2009, 7(4): 494-498.

[7] 刘毅超,吕建华,闵建平. 基于灰色理论的矿井电缆运行状态评估模型[J]. 信息技术, 2013(9): 163-166.

[8] 夏向阳,张琦,李明德,等. 证据理论与模糊理论集成的XLPE电缆绝缘状态评估研究[J]. 电力系统与控制, 2014, 42(20): 14-17.

[9] 李安贵,张志宏,孟艳,等. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

[10] 褚晓杰,杨太华. 城市地下电缆设施安全风险的模糊综合分析[J]. 能源与环境, 2013(6): 21-24.

[11] 周栾爱,唐文左,崔晓华,等. 电力电缆运行安全非

[D]. 武汉: 武汉大学硕士学位论文, 2002.

[5] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[6] 张国华,张文娟,薛鹏祥,等. 小波分析与应用基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.

[7] 刘贵忠,邱双亮. 小波分析及其工程应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.

[8] 黄子俊,陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-14.

[9] 赵宇,刘青,高授利,等. 高压XLPE电缆线路局部放电测试系统应用研究[J]. 电力设备, 2008, 9(9): 45-49.

[10] 葛景滂,邱昌容,谢恒堃. 局部放电测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.

[11] 陈庆国,龚细秀,李福祺. 变压器油中局部放电超高频检测的试验研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 23-25.

[12] 孙晓龙,李宝树,赵书涛. 虚拟仪器技术及其在电力系统中的应用[J]. 电力情报, 2001, 5(2): 5-9.

[13] 刘君华,贾慧芹. 虚拟仪器图形化编程语言[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.

[14] 李志谭,辛彦红. 基于LabVIEW的测试软件的研制[J]. 机械工程与自动化, 2006(1): 110-112.

[15] 陈锡辉,张银鸿. LabVIEW 20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[16] 丁玉剑. 基于LabVIEW的局部放电检测系统的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.

(收稿日期: 2015-08-04)

(上接第8页)

线性模糊综合评判模型[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(12): 83-86.

[12] 张琦,夏向阳,杨志峰,等. 基于模糊理论的XLPE电缆绝缘状态评估研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(2): 84-87.

[13] 兰继斌,徐扬,霍良安,等. 模糊层次分析法权重研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(9): 107-112.

[14] Thomas L. Saaty. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[15] 葛少云,闫大威,董智. 基于模糊综合评判的城市电网电缆改造[J]. 现代电力, 2005, 22(6): 37-40.

#### 作者简介:

梁敏(1990), 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统的稳定与控制;

李兴源(1945), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电、分布式发电。

(收稿日期: 2015-09-10)