

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.03.025

基于改进雷达图理论的交联聚乙烯电力电缆运行状态综合评估

王宗耀

(南昌工程学院, 南昌 330099)

摘要: 为了对电力电缆状态检修提供决策支持,提出了一种基于改进雷达图理论的交联聚乙烯电力电缆运行状态综合评估模型。通过预防性电气试验、在线监测技术、设备缺陷及运行检修记录等途径获取电缆特征变量,建立了电缆运行状态综合评价指标体系。运用改进的层次分析法得到各项指标的权重值,在此基础上,对雷达图中各评估指标对应的扇形区域进行排序和角度分配,推导出了交联聚乙烯电力电缆运行状态综合评估和指标属性灵敏度计算公式。结合实际算例对电缆运行状态进行了定量评估分析,并与现有方法进行比较验证了该模型的正确性与优越性。

关键词: 电力电缆; 雷达图; 绝缘老化; 状态检修; 层次分析法; 灵敏度分析

Operation Condition Evaluation for XLPE Power Cables Based on Improved Radar Chart Theory

WANG Zongyao

(Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: To provide a decision support for power cable condition based maintenance, a model for comprehensive evaluating operation condition of XLPE power cables is constructed based on modified radar chart theory. By obtaining the cable characteristic variables through preventive electrical experiments, on-line monitoring technology, and records of equipment defects and operation maintenance, a comprehensive evaluation indexes system of cable operation state is established. The improved analytic hierarchy process (AHP) method is used to obtain the weight for each condition index, the corresponding sector areas of the evaluation indexes are ranked, and their angles are distributed. Consequently, formulae for comprehensive evaluation of XLPE power cable operation condition and for index attribute sensitivity analysis are derived. Quantitative operation condition evaluation of a XLPE power cable is conducted with the proposed model through an actual example, and the result is compared with that of the existing methods. It is concluded that the proposed model is superior to the existing methods.

Key words: power cable; radar chart; insulation aging; condition based maintenance; analytic hierarchy process (AHP); sensitivity analysis

0 引言

随着电网建设规模的发展和电力设备质量的迅速提高,传统的电力设备定期检修模式已经很难适应现代电网及设备的管理要求。电力企业根据实际情况陆续开展了电力设备状态检修的尝试,为了规范输、变、配电设备检修管理,适应智能电网发展的需要,国家电网公司决定全面开展电网设备

状态检修工作。电力设备状态检修是以状态评价为基础,而电力设备状态评价是根据状态检修的要求,选取某些状态量,对设备所处的状态进行分级评定,从而为制定科学合理的检修计划提供参考依据。因此状态评价是开展状态检修的关键,应通过持续开展设备状态跟踪监视,综合停电试验、带电检测、在线监测等各种技术手段,准确掌握设备运行状态和健康水平。

为了提高电网供电可靠性,减少由于系统停电

造成的经济损失,通过对设备进行状态评价、风险评估,开展既符合安全运行的基本要求又具有合理成本的状态检修是当前大力发展智能电网条件下的必然趋势。电力电缆状态检修就是根据电缆设备的状态及安全风险,决定何时以何种方式开展设备检修,实现了“应修必修、修必修好”的目标。交联聚乙烯电力电缆是电力系统中传输电能的核心设备之一,其运行状态对整个电力系统的安全稳定运行具有重要影响。电缆一般敷设于地下,当其发生故障时,不像架空线路那样直观,必须借助仪器花费大量的人力、物力和时间排除故障,带来较大的停电损失。因此,对交联聚乙烯电力电缆采用科学、合理的检修策略,将运行过程中存在的问题发现于萌芽状态并及时采取有效措施,确保电缆安全可靠运行,具有重要的现实意义和研究价值。

电力电缆的相关研究引起了国内外广大电力工作者和学者的关注^[1-7],但对电力电缆运行状态的评估尚处于起步阶段。国内外研究成果主要集中在通过绝缘在线测量技术^[8]、局部放电在线监测和电缆线芯实测温度在线监测^[9]、红外热成像技术^[10]、绝缘老化水树枝检测技术^[11]、色谱分析技术^[12]等手段对电力电缆运行状态进行分析。上述文献报道的研究成果有一个共同点,即通过单一的在线监测技术对电缆的运行状态进行分析,没有形成系统、综合的电力电缆运行状态评估模型。文[13]主要分析了电力电缆本体以及电缆附件的综合绝缘诊断检测方法,对局部放电监测法、在线介质损耗角正切值法、谐波电流法、直流成分法、直流叠加法、低频交流叠加法等在线绝缘监测方法的影响因素和适应时段进行了总结,提出了对不同投运年限的电力电缆采取有针对性的绝缘诊断策略,提高电缆绝缘诊断的科学性。文[14]运用模糊灰色综合评判理论,建立了交联聚乙烯电力电缆健康度综合评价模型,通过预防性试验、在线监测技术、巡检和历史记录等手段获取相关数据,对电缆健康度进行评价,但是在构建模糊隶属度函数时受人为主观因素的影响较大,很难得到统一的灰类阈值,从而影响了该方法的可行性。笔者在现有研究成果的基础上,合理选取交联聚乙烯电力电缆运行状态特征参考变量,建立了基于改进雷达图理论的电力电缆运行状态综合评估数学模型,对电力电缆运行状态进行定量分析。

1 状态评估指标及权重值的确定

1.1 建立状态评估综合指标体系

在全面分析影响交联聚乙烯电力电缆运行

状况的基础上,结合预防性电气试验、家族性缺陷信息、在线监测技术以及历史记录数据,同时充分考虑工程应用的可操作性和相互独立性,建立了电力电缆运行状态综合评估指标体系,见图1。

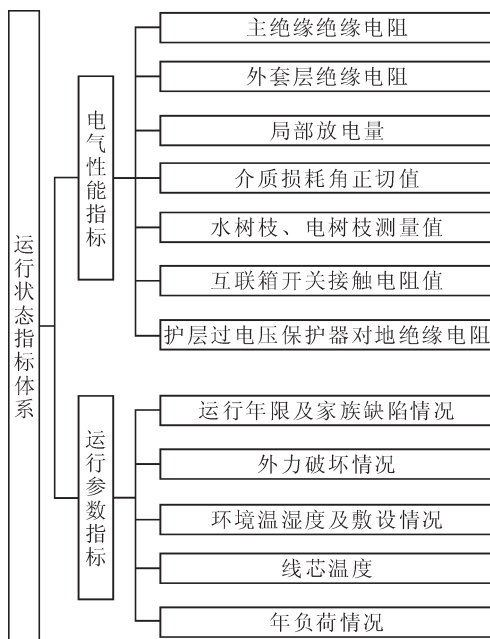


图1 电缆运行状态评估综合指标体系

Fig. 1 Evaluation index system for cables running state

具体包括: c_1 主绝缘绝缘电阻值、 c_2 外套层绝缘电阻值、 c_3 局部放电量、 c_4 介质损耗角正切值、 c_5 水树枝、电树枝测量值(直流成分法)、 c_6 互联箱开关接触电阻值、 c_7 护层过电压保护器对地绝缘电阻值、 c_8 运行年限及家族缺陷信息、 c_9 电缆遭受外力破坏情况、 c_{10} 环境温湿度及敷设情况、 c_{11} 线芯实测温度、 c_{12} 年负荷情况。

将电力电缆运行状况分为4种状态:正常状态(表示设备各状态量均处于稳定且在规程规定的注意值、警示值以内,可以正常运行);注意状态(设备的单项或多项状态量变化趋势朝接近标准限值方向发展,但未超过标准限值或部分一般状态量超过标准限值,但是仍然可以继续运行,应加强运行中的监视);异常状态(单项重要状态量的变化比较大,已接近或略微超过标准限值,应监视运行,并适时安排检修);严重状态(单项重要状态量严重超过标准限值,需要尽快安排检修)。

电力电缆具有一系列表征其运行状态的定量参数指标,文中定义相对劣化因子 c_{bad} (表示各项指标偏离正常状态的程度) 对初始数据进行标准化处理,当其值为0时表示该项指标处于最优状态,当其值为1时表示该项指标处于最劣状态。

$$c_{m, \text{bad}} = \begin{cases} \frac{c_m - c_{\text{chu}}}{c_{\text{zhu}} - c_{\text{chu}}}, & c_{\text{chu}} \leq c_m \leq c_{\text{zhu}} \\ \frac{c_{\text{chu}} - c_m}{c_{\text{chu}} - c_{\text{zhu}}}, & c_{\text{zhu}} \leq c_m \leq c_{\text{chu}} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: c_{chu} 表示指标状态参数的正常阈值, c_{zhu} 表示指标状态参数的注意阈值,根据 Q/GDW 168—2008《输变电设备状态检修试验规程》、Q/GDW 456—2010《电缆线路状态评价导则》、Q/GDW 643—2011《配网设备状态检修试验规程》、Q/GDW 645—2011《配网设备状态评价导则》确定各项指标的对应阈值系数; c_m 表示指标的实际值。

1.2 改进层次分析法

运用无需一致性检验的改进层次分析法^[15]确定电力电缆运行状态综合评估指标体系中各个评价指标的权重。算法具体步骤为:①选出指标集中最重要或最不重要的一个指标,记为 c_i ;②从剩下的指标集中再选出最重要或最不重要的一个指标,记为 c_j ;③依次类推,得到唯一的序关系 $c_i > c_j > \dots > c_k (i, j, k \in \{1 \sim 12\})$ 。接着确定相邻指标的相对重要程度。相邻指标 c_k 与 c_{k-1} 之间的重要程度之比用 $r_k = w_{k-1}/w_k$ 表示, w_k 表示第 k 个指标的权重值, $k=2 \sim 12$ 。结合前面确定的指标序关系计算出各指标之间的相对重要程度。 r_k 表示 c_k 与 c_{k-1} 两个指标之间相互比较的标度值。则:

$$r_{k-1} \geq r_k; \quad (2)$$

$$w_m = (1 + \sum_{k=2}^{12} \sum_{i=k}^{12} r_i)^{-1}; \quad (3)$$

$$w_{k-1} = r_k w_k \quad (4)$$

式(2)–(4)中: $k=2 \sim 12$; $w=[w_1, w_2, \dots, w_{12}]$ 为评价指标的权重向量。

2 基于雷达图的电缆运行状态评估模型

雷达图理论^[16-18]借助图形表达多属性决策模型中各项指标的数值关系,通过挖掘图像的数学特征得到直接、客观、科学的综合评估结果。传统的雷达图理论以 m 个评估指标为基础,将单位圆等分为 m 个扇形区域,没有区分各个指标在综合评估过程中的重要性,弱化了评估结果的可信性。其次,将等分扇形的半径作为各个指标的指标轴,造成相邻的指标共享同一扇形区域的信息,模糊了各指标在综合评估中的作用。对于同一个评价模型,在应用雷达图时各个评估指标的排序不同,则绘制的图形也不相同,最终的评估结果就存在差异。笔者采用改进的雷达图评估方法^[17-18]对电力电缆运行状态进行分析。改进的雷达图法基于各指标的权重值进行评

估指标的排序,有效地解决了由于指标排序不确定而导致的雷达图形状不确定问题;取各个扇形区域的对角线作为评估指标轴,使得每个指标一一对应于某个独立的扇形区域,而不存在两个指标共享一个扇形区域的弊端,图形不仅反映了单个指标对评估结果的影响,而且体现了各个指标间的相互作用和影响,便于从整体上把握评估对象的特征。

2.1 模型的实现步骤

基于改进雷达图方法的电力电缆运行状态综合评估模型的具体步骤为:

1)运用式(1)对数据进行标准化处理,将电力电缆运行状态的12个指标归一化为标准值。

2)运用改进的层次分析法,得到电力电缆运行状态各个评价指标的权重 $w=[w_1, w_2, \dots, w_{12}]$,对 w 进行降序排列,得到排序后的权重 $v=[v_1, v_2, \dots, v_{12}]$ 。第 k 项指标对应的扇形角度 $q_k=2pv_k$,将按由大到小的权重顺序所对应的各个指标的指标值重新排列后得到 $z=[z_1, z_2, \dots, z_{12}]$ 。

3)以某点为圆心,向单位圆上的 A 点引射线 oa ,依次作相邻角度的其余11条射线,分别为 $ob, oc, od, oe, of, og, oh, oi, oj, ok, ol$,接着作各扇形 $aob, boc, \dots, loa$ 的对角线,与圆交于 $p_1, p_2, \dots, p_{12}$,以 $op_1, op_2, \dots, op_{12}$ 作为指标轴。

4)将 $z=[z_1, z_2, \dots, z_{12}]$ 对应的指标值在指标轴上标出对应的点,依次得到点 $a', b', c', d', e', f', g', h', i', j', k', l'$,依次连接12个点后就可以得到雷达图。

依次连接各指标轴与单位圆的交点,得到基准多边形 $abcdefghijkl$,设其面积为 S ,周长为 L ,设多边形 $a'b'c'd'e'f'g'h'i'j'k'l'$ 的面积为 S' ,周长为 L' 。由三角形正弦、余弦定理推得:

$$S = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^{11} \sin\left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2} \pi\right) + \sin\left(\frac{v_1 + v_{12}}{2} \pi\right) \right]; \quad (5)$$

$$L = \sum_{i=1}^{11} \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2} \pi\right)} + \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{v_1 + v_{12}}{2} \pi\right)}; \quad (6)$$

$$S' = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^{11} z_i z_{i+1} \sin\left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2} \pi\right) + z_1 z_{12} \sin\left(\frac{v_1 + v_{12}}{2} \pi\right) \right]; \quad (7)$$

$$L' = \sum_{i=1}^{11} \sqrt{z_i^2 + z_{i+1}^2 - 2z_i z_{i+1} \cos\left(\frac{v_i + v_{i+1}}{2} \pi\right)} + \sqrt{z_1^2 + z_{12}^2 - 2z_1 z_{12} \cos\left(\frac{v_1 + v_{12}}{2} \pi\right)} \quad (8)$$

$$\text{引入特征变量 } \delta_1, \delta_2 \\ \delta_1 = S'/S; \quad (9)$$

$$\delta_2=1+|S''-S'|/S''; \quad (10)$$

$$S''=S(L'/L)^2。 \quad (11)$$

定义电力电缆运行状态综合评估因子 y

$$y=\sqrt{\delta_1\delta_2}。 \quad (12)$$

2.2 基于边界限定原理的综合评估结果确定及灵敏度分析

由于各评估指标值代表电力电缆的消极发展方向,所以综合评估因子值越小电缆运行状态越好,反之越差。对于某一待评对象,若所有指标值均为分级评判标准的边界值,那么综合评估因子也就对应于评判结果的边界,根据这一基本思想,结合电力电缆运行状态综合评估的实际,笔者提出了基于边界限定原理的综合评估结果确定方法。具体方法是:分别将电缆运行状态分级指标边界值带入式(5)–(12)求得运行状态综合评判结果的边界信息,在单位圆内以0.4为半径作同心圆,以综合评判结果的边界信息为分级节点,对区间[0.4,1]进行划分。最后得出4个区间[0.4,0.47]、(0.47,0.7]、(0.7,0.93]、(0.93,1],分别对应电力电缆运行的正常状态、注意状态、异常状态、严重状态。

设 y_s, y_t 分别表示电缆在状态 s, t 下的综合评估因子,当电缆在 s 状态下的属性值 c_{sh} 扰动 Δc_{sh} 时,新属性值和综合评估因子分别为 $\bar{c}_{sh}, \bar{y}_s$ 。

$$\bar{c}_{sh}=c_{sh}+\Delta c_{sh}; \quad (13)$$

$$\bar{y}_s=y_s+\psi(\Delta c_{sh})。 \quad (14)$$

式(14)中, ψ 是关于 c_{sh} 的函数。

为便于计算综合评估因子关于属性值的灵敏度,做如下定义^[9]:

定义1:令 $\Delta c'_{sth}$ 表示当电缆在状态 s 和 t 下的排序关系变化时属性值 c_{sh} 的最小变化值,满足式(15)

$$\Delta c'_{sth}=\min\{|\Delta c_{sh}|\}。 \quad (15)$$

定义2:令 $\Delta \bar{c}_{sth}$ 表示当电缆在状态 s 和 t 下的排序关系变化时属性值 c_{sh} 的最小相对变化值,满足式(16)

$$\Delta \bar{c}_{sth}=\min\{|\Delta c_{sh}|\}/c_{sh}。 \quad (16)$$

定义3:令 L_s 表示电缆在状态 s 下关于指标属性值的灵敏度,满足式(17)

$$L_s=1/\min_{1\leq h\leq 12}\min_{1\leq t\leq m}\{|\Delta \bar{c}_{sth}|\}。 \quad (17)$$

式(17)中, $s=1\sim m, m$ 表示电缆的运行方式数。

定义最优、最劣距离 d_s^+, d_s^- 分别为:

$$d_s^+=\sum_{h=1}^{12}(\max_{1\leq s\leq m}c_{sh,\text{bad}}-c_{sh,\text{bad}})w_h; \quad (18)$$

$$d_s^-=\sum_{h=1}^{12}(c_{sh,\text{bad}}-\min_{1\leq s\leq m}c_{sh,\text{bad}})w_h。 \quad (19)$$

电缆在状态 s 和 t 下,当指标扰动时 $\bar{c}_{sh}=c_{sh}+\Delta c_{sh}, \bar{d}_s^+=d_s^+-\Delta c_{sh}w_h, \bar{d}_s^-=d_s^-+\Delta c_{sh}w_h$, 改变 y_s 和 y_t 排序关系的 Δc_{sh} 满足如下充要条件。

若 $y_s > y_t$, 当 $(d_s^+-d_t^+)/w_h \leq \Delta c_{sh} \leq 1-c_{sh}$ 时, 排序关系改变, 即 $\bar{y}_s \leq y_t$ 。证明:

要使 $\bar{y}_s \leq y_t$ 成立 $\Leftrightarrow \bar{d}_s^+ \leq d_t^+ \Leftrightarrow d_s^+-\Delta c_{sh}w_h \leq d_t^+ \Leftrightarrow \Delta c_{sh} \geq (d_s^+-d_t^+)/w_h$, 又 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq 1-c_{sh}$, 综合后得证。

若 $y_s = y_t$, 当 $0 < \Delta c_{sh} \leq 1-c_{sh}$ 时, $\bar{y}_s < y_t$ 或当 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} < 0$ 时, $\bar{y}_s > y_t$ 。证明:

要使 $\bar{y}_s < y_t$ 或 $\bar{y}_s > y_t$ 成立 $\Leftrightarrow \bar{d}_s^+ < d_t^+$ 或 $\bar{d}_s^+ > d_t^+ \Leftrightarrow d_s^+-\Delta c_{sh}w_h < d_t^+$ 或 $d_s^+-\Delta c_{sh}w_h > d_t^+ \Leftrightarrow \Delta c_{sh} > 0$ 或 $\Delta c_{sh} < 0$, 又 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq 1-c_{sh}$, 综合后得证。

若 $y_s < y_t$, 当 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq (d_s^+-d_t^+)/w_h$ 时, 排序关系改变, 即 $\bar{y}_s \geq y_t$ 。证明:

要使 $\bar{y}_s \geq y_t$ 成立 $\Leftrightarrow \bar{d}_s^+ \geq d_t^+ \Leftrightarrow d_s^+-\Delta c_{sh}w_h \geq d_t^+ \Leftrightarrow \Delta c_{sh} \leq (d_s^+-d_t^+)/w_h$, 又 $-c_{sh} \leq \Delta c_{sh} \leq 1-c_{sh}$, 综合后得证。

3 实例分析

以某条 110 kV 交联聚乙烯电力电缆线路为例,对 2012 年该电缆在不同运行方式下的相关指标值进行测量,统计的平均结果的标准值见表 1。

表 1 待评电缆指标值

Table 1 Cable index value

指标	指标值	指标	指标值
c_1	0.32	c_7	0.39
c_2	0.38	c_8	0.68
c_3	0.29	c_9	0.35
c_4	0.21	c_{10}	0.22
c_5	0.48	c_{11}	0.45
c_6	0.33	c_{12}	0.36

运用改进的层次分析法得到各项指标的权重结果见表 2。

表 2 各指标的权重值

Table 2 The weight information

指标	权重系数	指标	权重系数
c_1	0.091 1	c_7	0.049 8
c_2	0.082 7	c_8	0.100 5
c_3	0.095 4	c_9	0.098 5
c_4	0.070 1	c_{10}	0.086 3
c_5	0.102 8	c_{11}	0.101 1
c_6	0.050 2	c_{12}	0.071 5

运用文中所提方法,得到雷达图各项特征变量的值见表 3。从表 3 中结果可知,电力电缆运行状态综合评估因子为 0.488 5,该电缆总体处于注意状态,仍然可以继续运行,但是运行检修人员应加强

监测和巡视,并及时记录各指标值,注意各指标数据的发展趋势。

表 3 雷达图法计算结果
Table 3 Calculation results

特征变量	计算值	特征变量	计算值
S	1.551 0	S''	0.580 1
S'	0.231 1	δ_1	0.149 0
L	3.131 7	δ_2	1.601 6
L'	1.915 2	γ	0.488 5

计算各指标属性的灵敏度值,结果见图 2。从图 2 可知,主绝缘绝缘电阻值、局部放电量、介质损耗角正切值、水树枝电树枝测量值、电缆遭受外力破坏情况、环境温湿度及敷设情况等 6 项指标的灵敏度相比其他指标的灵敏度都较大,表明此 6 项指标的变化对电缆运行状态评估结果影响较大,与运行经验相符。其中水树枝、电树枝测量值的影响最大,在实际评估决策中,对灵敏度较高的指标要予以特别关注。

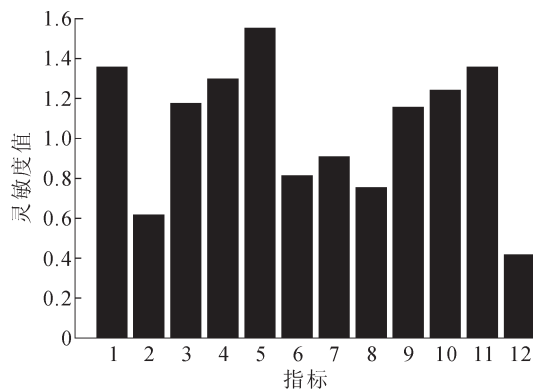


图 2 各指标的灵敏度

Fig. 2 Sensitivity value of each index

分别运用文[14,20]的方法对该算例进行分析,结果见表 4。由文[14]的评估结果,根据最大隶属度原则可知该电缆处于注意状态。由文[20]的评估结果,根据信度准则^[20]应该将其评定为注意状态,由此可知文中评估结果与现有方法一致,进一步验证了该模型的有效性。

表 4 计算结果比较
Table 4 Comparison of calculation results

评估方法	文[14]	文[20]
结果	[0.430 6, 0.569 4, 0, 0]	[0.293 2, 0.374 1, 0.266 9, 0.065 8]

4 结语

文中提出了基于改进雷达图理论 of 交联聚乙烯电力电缆运行状态综合评估模型,可以对电力电缆的实时运行状态作出准确、客观的定量化分析,

能够为电力电缆实施状态检修提供决策支持。同时,该模型具有较强的可操作性,克服了模糊评价理论中隶属度函数难于准确设定的缺点,也摆脱了其分析模型中求取差异度不确定系数的束缚,具有更好的数学特性。创造性地推导和证明了基于改进雷达图理论的评估指标属性值灵敏度分析计算公式,为管理者控制灵敏度高的指标参数提供了参考依据。开展电力电缆状态检修工作应结合电网的实际情况,合理的工作目标和总体规划,适应现代电网迅猛发展和电力技术飞速进步的要求,不断建立健全制度体系,提升信息化水平,提高运行人员素质,更好地满足电网安全、可靠、经济运行的要求。

参考文献:

- [1] 鹿洪刚,覃 剑,陈祥训,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术,2004,28(20):58-63.
LU Honggang, QIN Jian, CHEN Xiangxun, et al. Overview of power cable fault location[J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 58-63.
- [2] 王 玮,蔡 伟,张元芳,等. 基于阻抗法的电力电缆高阻故障定位理论及试验[J]. 电网技术,2001,25(11):38-41.
WANG Wei, CAI Wei, ZHANG Yuanfang, et al. On-line distributed fault section estimation system with radial basis function neural network[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 38-41.
- [3] 于玉泽,覃 剑,李功新,等. 电缆-架空线混合线路故障测距方法综述[J]. 电网技术,2006, 30(17):64-69.
YU Yuze, QIN Jian, LI Gongxin, et al. A survey on fault location methods for hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 64-69.
- [4] 熊小伏,林金洪. 基于小波重构的电力电缆故障测距方法[J]. 电网技术,2003,27(6):36-38.
XIONG Xiaofu, LIN Jinhong. A wavelet reconstruction based fault location method for power cables[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 36-38.
- [5] 赵艳粉. 长距离跨桥高压电缆的关键技术设计[J]. 电网与清洁能源,2013,29(11):25-28.
ZHAO Yanfen. Key technologies in laying high-voltage cables under long-distance bridges[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11): 25-28.
- [6] 李小峰,冯 宾,陈中豪,等. 500 kV 交流超高压电缆选型分析[J]. 电网与清洁能源,2013,29(11):29-32.
LI Xiaofeng, FENG Bin, CHEN Zhonghao, et al. Analysis of the type selection of the 500 kV AC extra high voltage cables[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(11): 29-32.

- [7] 韩伟,吴杰. 基于小波变换的信号相关技术在电力电缆故障测距中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 69-72.
HAN Wei, WU Jie. Application of wavelet transform based signal correlation technique in fault location of power cable[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 69-72.
- [8] 罗华煜,关根志,易小羽. 基于接地线电流法的电力电缆绝缘的在线监测[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 63-65.
LUO Huayu, GUAN Genzhi, YI Xiaoyu. Study of on-line monitoring of XLPE power cable by earth line current method[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 63-65.
- [9] 罗俊华,周作春,李华春,等. 电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 169-172.
LUO Junhua, ZHOU Zuochun, LI Huachun, et al. Application of operation temperature detection technique for on-line power cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 169-172.
- [10] 张文新,李华春,周作春. 电力电缆运行状态的检测研究[J]. 电力设备, 2007, 8(4): 39-42.
ZHANG Wenxin, LI Huachun, ZHOU Zuochun. Study on monitoring of operation condition for power cable[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(4): 39-42.
- [11] SVERRE H, HALLVARD F, ROLAND E. Water treeing and condition assessment of high voltage XLPE cables[R]. Boston, U.S.: IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2002.
- [12] SU Q. Insulation condition assessment of HV cables[C]// Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: [s.n.], 2007: 1127-1131.
- [13] 邢益平,郑晓泉. XLPE 电力电缆综合绝缘诊断策略研究[J]. 电线电缆, 2006(5): 9-11.
XING Yiping, ZHENG Xiaoquan. Study on the composite insulation diagnosis in XLPE power cables[J]. Electric Wire & Cable, 2006(5): 9-11.
- [14] 李平,洪思远,李海锋. XLPE 电力电缆健康度的模糊灰色综合评价方法[J]. 机电工程技术, 2012, 41(1): 20-24.
LI Ping, HONG Siyuan, LI Haifeng. Study of XLPE power cables health state evaluation based on fuzzy grey theory[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012, 41(1): 20-24.
- [15] 李娜娜,何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 55-61.
LI Nana, HE Zhengyou. Power quality comprehensive evaluation combining subjective weight with objective weight[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 55-61.
- [16] 李国栋,李庚银,杨晓东,等. 基于雷达图法的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 70-74.
LI Guodong, LI Gengyin, YANG Xiaodong, et al. A comprehensive power quality evaluation model based on radar chart method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 70-74.
- [17] 庄彦,康重庆,胡江溢,等. 售电市场质量及其综合评价[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 25-29.
ZHUANG Yan, KANG Chongqing, HU Jiangyi, et al. Quality of power sale market and its comprehensive assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 25-29.
- [18] 郑惠莉,刘陈,翟丹妮. 基于雷达图的综合评价方法[J]. 南京邮电学院学报, 2001, 21(2): 75-79.
ZHENG Huili, LIU Chen, ZHAI Danni. Comprehensive evaluating method based on radar-graph[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2001, 21(2): 75-79.
- [19] TRANTAPHYLLOU E, SABCHEZ A. Sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods[J]. Decision Sciences, 1997, 28(1): 151-187.
- [20] 廖瑞金,郑含博,杨丽君,等. 基于集对分析方法的电力变压器绝缘状态评估策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 55-60.
LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, YANG Lijun, et al. A power transformer insulation condition assessment method based on set pair analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 55-60.
- 王宗耀(1983—),男,硕士,研究方向为电力系统最优运行与规划。