

证据理论与模糊理论集成的XLPE电缆绝缘状态评估研究

夏向阳¹, 张琦², 李明德³, 朱新良², 刘晖瑶¹, 郑鹏³

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省电力公司东江水力发电厂, 湖南 资兴 423403;
3. 衡阳市产商品质量监督检验所, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 为提高XLPE电缆的绝缘诊断精度, 提出了多绝缘参数综合评估方法。针对D-S证据理论中各证据体可信度分配难以确定的问题, 建立了证据理论与模糊理论集成的XLPE电缆绝缘状态综合评估模型。此模型将模糊理论中的模糊集合与隶属度函数概念引入证据理论, 利用隶属度函数构造证据理论的合理信度函数分配。在此基础上, 通过证据理论联合每个证据体的可信度从而形成最终的电缆绝缘状态评估结果。实例分析表明该模型可有效评估XLPE电缆的绝缘状态, 具有一定的理论和实用价值。

关键词: XLPE电缆; 绝缘综合评估; D-S证据理论; 模糊理论; 隶属度函数

Research on insulation assessment of XLPE cables based on evidence and fuzzy theory integrated method

XIA Xiang-yang¹, ZHANG Qi², LI Ming-de³, ZHU Xin-liang², LIU Hui-yao¹, ZHENG Peng³

(1. College of Electrical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Dongjiang Hydropower Plant, Hunan Electric Power Company, Zixing 423403, China; 3. Institute of Products Quality Supervision and Inspection, Hengyang 421001, China)

Abstract: To improve insulation diagnosis accuracy of XLPE cables, the idea of comprehensive insulation evaluation based on multiple parameters is proposed. A evidence fusion diagnosis model based on fuzzy theory is established which uses fuzzy set and membership function to construct the distribution of reliability function of evidence theory and effectively solve the difficulty of determining reliability allocation of each evidence, on the basis of the model, evidence theory combines the credibility of each evidence to form the final insulation assessment result. Example analysis shows that the proposed model can effectively estimate the insulation of XLPE cables, and has a certain theoretical and practical value.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2011JJ5027).

Key words: XLPE cables; comprehensive assessment of insulation; D-S evidence theory; fuzzy theory; membership function

中图分类号: TM726.4 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0013-06

0 引言

随着交联聚乙烯(XLPE)电缆在电网中使用量的迅速增加, 相应的绝缘故障诊断任务愈发艰巨, 传统停电预防性试验存在的诸如耗时耗力、损害电缆等弊端已使其难以满足人们对电能传输安全、可靠、优质的要求, 而通过在线监测的方法则可有效弥补其缺陷, 无疑是今后电缆绝缘检测的发展方向^[1]。近二十年来, 国外以日本和欧美为代表的发达国家在XLPE电缆绝缘在线监测领域进行了大量研究, 开发出了介质损耗因数法、直流成分法、

接地线电流法、局部放电法等在线监测方法, 并将研制的在线监测装置广泛用于电缆绝缘监测, 积累了大量实测数据以及电缆绝缘老化缺陷判据^[2-3]; 国内则对国外的在线监测技术和方法进行了跟踪研究, 虽也取得一定成果, 但因起步较晚, 相对缺乏自己的电缆在线监测结果积累, 加上现场干扰、方法本身存在缺陷及监测装置的精度制约等问题, 仅用单一方法通常无法准确进行电缆的绝缘状态评估, 从而导致XLPE电缆的绝缘故障诊断存在不确定性^[4]。文献[5]针对目前高压断路器故障诊断存在的不足, 利用改进EEMD法将反映故障的振动信号和声波信号进行综合, 有效提高了断路器故障类型的确诊率; 文献[6]基于电力变压器工作时状态信息

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2011JJ5027); 湖南省科技计划项目(2013GK2417)

种类繁多的特性,应用神经网络综合诊断方法很好地解决了以往诊断不确定性的问题;文献[7]则提出了基于输电线路舞动振幅、舞动频率、风参数、覆冰厚度等参数的综合评估体系,可有效评估输电线路的舞动状态。XLPE 电缆与上述电力设备相似,运行时不同绝缘参数有着不同的表现形式,各参数反映绝缘老化的灵敏度也有所不同,因此将“多绝缘参数综合评估思想”引入到 XLPE 电缆的绝缘故障诊断中,可以充分利用各项绝缘参数来准确、高效地进行电缆的绝缘状态评估。

随着人工智能技术的快速发展,人工神经网络、贝叶斯估计、粗糙集理论等方法被越来越多地用于电力设备的状态评估中,且取得了很好的应用效果^[8-9],其中D-S证据理论作为目前故障诊断中广泛应用的一种方法,其在处理不确定信息方面独具优势,因此本文将D-S证据理论用于XLPE电缆的绝缘综合评估,考虑到传统证据理论存在各证据体可信度分配难以确定的问题^[10],提出一种证据理论与模糊理论集成的XLPE电缆绝缘综合评估模型,该模型将证据理论与模糊理论相结合,利用模糊理论中的模糊集合与隶属度函数来构造各绝缘参数可信度函数分配,从而使得综合评估结果更加精确有效。

1 XLPE 电缆绝缘参数分类

介质损耗因素法、接地线电流法等在线监测方法的实质是通过带电检测电缆运行中所变的各种能反映其绝缘状态的渐进变化来达到绝缘监测的目的。目前 XLPE 电缆绝缘在线监测的对象主要包括^[11-13]:

(1) 介质损耗角正切。介质损耗是交联聚乙烯在电场作用下因介质电导和介质极化的滞后效应导致其内部引起的能量损耗,介质损耗角正切 $\tan \delta$ 则是反映电缆绝缘介质损耗的特征参量,是评价绝缘性能的重要指标,当电缆发生老化时, $\tan \delta$ 会相应增加。

(2) 直流泄漏电流。XLPE 电缆在制造、敷设过程中不可避免存在气隙、杂质、毛刺等缺陷,在电场、热、机械力等因素作用下会出现水树枝现象,具有整流作用的水树枝是造成 XLPE 电缆绝缘故障的最主要原因,而含水树的 XLPE 电缆在交流电压作用下会有纳安级的直流电流流过其绝缘层,因此通过检测 XLPE 电缆的直流泄漏电流可有效发现电缆的水树老化情况。

(3) 接地电容电流。XLPE 电缆绝缘老化不仅使得 $\tan \delta$ 增大,同时会伴随着电容量的增加,从而导致电缆的接地电容电流增大,所以其也是电缆绝缘

监测的一个重要参数。

(4) 其他可测绝缘参数。如局部放电法监测的局部放电量、低频叠加法监测的有功电流分量、损耗电流法测量的损耗电流等。

2 XLPE 电缆绝缘综合评估

2.1 D-S 证据理论

D-S 证据理论^[14]建立在“识别框架 Θ ”上,用于故障诊断时, Θ 表示某设备故障可能原因的有限集,且这些原因互斥。设 2^Θ 为所有子集构成的集合,如果有集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 满足: $m(\Phi)=0$ 和 $\sum_{A \in \Theta} m(A)=1$,则称 m 为 Θ 上的基本信度函数分配, $m_i(j)$ 表示故障征兆 i 对故障原因 j 的信度函数分配,其计算公式为

$$m_i(j) = \frac{C_i(j)}{\sum_{j=1}^{N_c} C_i(j) + N_s(1-R_i)(1-\alpha_i\beta_i)} \quad (1)$$

式中: $C_i(j)$ 为信度函数分配公式中的相关系数;

$\alpha_i = \max_{j=1}^{N_c} \{C_i(j)\}$ 为故障征兆 i 的最大相关系数;

$\beta_i = \alpha_i / \sum_{j=1}^{N_c} C_i(j)$ 为征兆 i 的相关分配值;

$R_i = \alpha_i \beta_i / \sum_{j=1}^{N_s} \alpha_j \beta_j$ 为征兆 i 的可靠性系数; N_s 为传感器采集到的征兆总数; N_c 为故障原因类型数。

D-S 证据理论利用 Dempster 合成规则将两个证据进行组合,组合公式为

$$\begin{cases} m(C) = 0 & C = \phi \\ m(C) = \frac{1}{1-k} \sum_{A \cap B = C} m_1(A)m_2(B) & C \neq \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中, k 称为规范系数,且

$$k = \sum_{A \cap B = \phi} m_1(A)m_2(B) \quad (3)$$

对于多个证据的组合,可采用式(2)对证据进行两两融合。

2.2 模糊理论

模糊理论(Fuzzy Logic)^[15]以模糊集合与隶属度函数为基础,用于故障诊断时可依据故障原因和征兆之间存在的某种模糊关系,用隶属度表示各故障征兆的不确定性。

设 F 是论域 U 在闭区间 $[0, 1]$ 的一个映射,即对于论域 U 中的任意元素 x ,都有一个数 $F(x) \in [0, 1]$ 与之对应,则称 F 是 U 上的一个模糊集合, $F(x)$ 为模

糊集合 F 的隶属函数, $F(x)$ 的值为 x 对模糊集合 F 的隶属度。

假设 $X=(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_k)$ 为某设备故障征兆集合, $Y=(Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_h)$ 为相应设备故障原因集合, 将 Y 与 X 分别表示矩阵的行和列, 可以得到故障原因与故障征兆之间的模糊矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1h} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2h} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{ih} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kj} & \cdots & a_{hk} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, $0 \leq a_{ij} \leq 1$, $1 \leq i \leq k$, $1 \leq j \leq h$ 。矩阵元素 a_{ij} 即表示第 x_i 种征兆对第 y_j 种故障的隶属度。 a_{ij} 的具体取值需要依靠合适的隶属函数得到。

2.3 综合评估模型的建立

在D-S证据理论中, 多个传感器的输出信息即在识别框架幂集 2^θ 下的信度函数分配, 利用信度函数分配从而得到各证据的可信度分配, 再在证据组合规则下进行证据体的组合从而实现多源信息综合, 因此如何从各传感器采集到的输出信息中获得其合理信度分配是综合评估的关键所在。就XLPE电缆而言, 因各绝缘参数判据不同, 其绝缘状态的判断很大程度上具有模糊性, 只是基于各绝缘参数得到的电缆属于某绝缘状态的可能性并非完全一致, 这就为绝缘参数的可信度分配带来困难。因此, 为解决XLPE电缆绝缘状态综合评估中各绝缘参数可信度分配难以确定的问题, 可将模糊理论与证据理论进行结合, 把模糊理论中的模糊集合与隶属度函数概念运用到证据理论当中, 建立基于模糊理论的证据综合评估模型: 该模型将识别框架看作模糊集合, 根据电缆绝缘参数特性建立识别框架的隶属函数, 利用隶属函数得到各绝缘参数的隶属度 a_{ij} 后, 用隶属度 a_{ij} 来代替相应绝缘参数信度函数分配公式(1)中的相关系数 $C_i(j)$, 这样便可由隶属度得到各绝缘参数的信度函数分配并求出可信度分配, 最后用D-S证据理论的合成规则联合每个绝缘参数的可信度形成最终的评估结果。评估模型如图1所示。

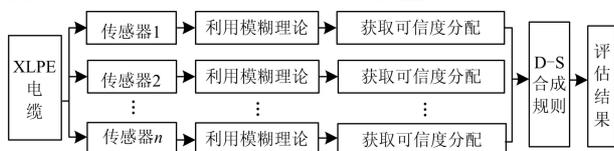


图1 基于模糊理论的证据评估模型

Fig. 1 Evidence fusion assessment model based on fuzzy theory

该评估模型的理论基础在于通过隶属函数求出的各绝缘参数隶属度 a_{ij} 与相应绝缘参数信度函数分配公式(1)中的相关系数 $C_i(j)$ 在物理意义上都表示根据某一绝缘参数来评估XLPE电缆属于哪种绝缘状态的概率, 两者存在正相关性, 所以采用此种处理方法是可行的, 而且加入模糊理论后该评估模型在求取各绝缘参数的隶属度时已经完成了电缆的初步绝缘诊断, 只需将初步诊断结果代入信度函数分配公式(1)中即可求出各绝缘参数的可信度分配, 从而再进行证据理论融合以得到最终的综合评估结果。

3 实例分析

为验证该评估模型的有效性, 对某条长110 m的10 kV XLPE电缆进行绝缘诊断, 其多绝缘参数在线监测原理图如图2所示。

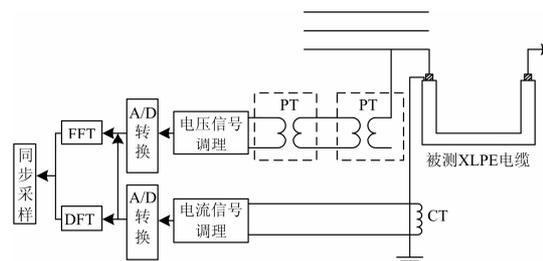


图2 XLPE电缆多绝缘参数在线监测原理图

Fig. 2 Schematic diagram of XLPE cables measuring unit

图2中, 加装在XLPE电缆接地线上的电流传感器CT用以测取电缆接地线电流信号(包含直流泄露电流和接地电容电流), 经调理模块滤波放大后送入A/D转换器进行模数转换, 再通过离散傅里叶变换(DFT)计算出直流泄露电流和接地电容电流; 同时为获取XLPE电缆的 $\tan \delta$ 值, 设置电压传感器PT从电压互感器PT处获取电缆运行电压, 同样经信号调理模块与A/D转换器进行滤波放大和模数转换, 变为数字信号后将其与之前得到的电流信号进行快速傅里叶变换(FFT)得到两个信号的基波, 进一步求出两基波的相位差后便可计算出 $\tan \delta$ 值, 因此, 该在线监测装置可对介质损耗角正切 $\tan \delta$ 、直流泄漏电流 I_l 、接地电容电流 I_c 三种绝缘参数进行同步采样, 且采集到的绝缘参数数值如表1所示。

表1 绝缘参数在线监测数据

Table 1 Insulation parameters on-line monitoring data

绝缘参数	在线监测数值
$\tan \delta / \%$	0.112
I_l / nA	6.441
I_c / A	0.418

建立多绝缘参数综合评估模型。为细化电缆绝缘劣化缓慢过程,把XLPE电缆绝缘状态分为“良”、“中”、“差”三个级别,设识别框架 $\Theta=\{\text{良}, \text{中}, \text{差}\}$ 。

首先,根据模糊理论确定三个绝缘参数隶属度。设三个绝缘参数为论域 $U=\{u_1, u_2, u_3\}$,其中, u_1 表示介质损耗角正切 $\tan \delta$, u_2 表示直流泄漏电流 I , u_3 表示接地电容电流 I_c ;将识别框架 Θ 看作是一个模糊集合,则有 $\Theta=F=\{f_1, f_2, f_3\}$,其中, f_1 、 f_2 、 f_3 为建立在论域 U 上的评价电缆绝缘状态的三个模糊子集,即 f_1 为“良”, f_2 为“中”, f_3 为“差”。将 F 与 U 分别表示矩阵的行和列,得到模糊关系矩阵 M 如表2所示。

表2 XLPE 电缆绝缘模糊矩阵 M

Table 2 XLPE cable insulation for fuzzy matrix M

	良	中	差
介质损耗角正切	a_{11}	a_{12}	a_{13}
直流泄漏电流	a_{21}	a_{22}	a_{23}
接地电容电流	a_{31}	a_{32}	a_{33}

为求得各绝缘参数对各绝缘状态的隶属度,即矩阵 M 中各分量元素的取值,需建立合适的隶属度函数。XLPE电缆运行良好时绝缘参数只在某个正常范围波动,发生绝缘劣化时才会偏离正常范围,因此若电缆绝缘状态发生变化,其过渡部分应具非线性。由隶属度指派方法^[16]可知,岭型分布隶属函数中的参数与实际电缆绝缘参数状态转换具有较好的对应性,物理意义清晰,因此采用岭型分布中的偏小型、中间型、偏大型隶属函数来分别确定模糊子集 f_1 、 f_2 、 f_3 的隶属度,三种隶属函数分布图如图3所示。

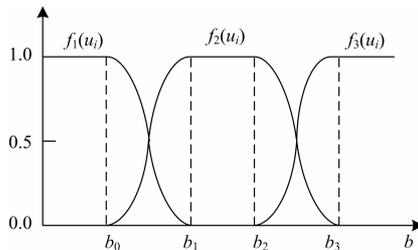


图3 各绝缘状态隶属函数分布图

Fig. 3 Membership function distribution of each insulation state

图3中, $f_1(u_1)$ (偏小型)、 $f_2(u_2)$ (中间型)、 $f_3(u_3)$ (偏大型)分别为“良”、“中”、“差”三种绝缘状态的隶属函数, $b_0 \sim b_1$ 、 $b_2 \sim b_3$ 分别是电缆绝缘状态由“良”转“中”、由“中”转“差”时的过渡部分,参考预防性试验及以往绝缘判据^[17-18]后得到各绝缘参数 b_i ($i=0, 1, 2, 3$)取值如表3所示。

按照各绝缘状态的隶属函数分布求出模糊矩

阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} 0.5104 & 0.4896 & 0.0000 \\ 0.5058 & 0.4942 & 0.0000 \\ 0.5376 & 0.4624 & 0.0000 \end{bmatrix} \quad (5)$$

表3 各绝缘参数 b_i ($i=0, 1, 2, 3$) 取值

Table 3 Selection of b_i of each insulation parameter

绝缘参数	b_0	b_1	b_2	b_3
$\tan \delta/\%$	0.1	0.2	0.4	0.5
直流泄漏电流/nA	5	10	95	100
接地电容电流/A	0.33	0.66	0.9	1.32

从模糊矩阵 M 可以看出各绝缘参数对绝缘状态“良”的隶属度均略大于对绝缘状态“中”的隶属度,因此实际上已经完成了XLPE电缆的初步诊断。但是由于在实际数据采集中存在诸多干扰,初步诊断结果可能存在误差,而且各绝缘参数属于“良”与“中”的隶属度界限并不明显,所以有必要运用证据理论来提高其诊断精度。

根据综合评估模型,有识别框架 $\Theta=F=\{f_1, f_2, f_3\}$,将各绝缘参数隶属度 a_{ij} ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$)代替相应绝缘参数信度函数分配公式(1)中的相关系数 $C_i(j)$ ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$)后得到各绝缘参数的信度函数分配,利用式(1)计算出三个绝缘参数证据体对绝缘状态命题的基本可信度,计算结果如表4所示。

表4 各绝缘参数的可信度分配

Table 4 Belief assignment of each insulation parameter

绝缘参数	良/ f_1	中/ f_2	差/ f_3
$\tan \delta/\%$	0.662 0	0.338 0	0.000 0
I/nA	0.683 8	0.316 2	0.000 0
I_c/A	0.692 4	0.307 6	0.000 0

最后,根据式(2)对表4数据进行综合,首先计算介质损耗角正切 $\tan \delta$ 与直流泄露电流 I 综合后的各绝缘状态可信度分配 $m_1(f_1)$ 、 $m_1(f_2)$ 、 $m_1(f_3)$,然后计算接地电容电流 I_c 与 m_1 综合后的各绝缘状态可信度分配 $m(f_1)$ 、 $m(f_2)$ 、 $m(f_3)$, m 即为最终的评估结果,其具体数值如表5所示。

表5 综合评估结果

Table 5 Comprehensive assessment results

绝缘状态	输出结果/ m
良/ f_1	0.808 9
中/ f_2	0.191 1
差/ f_3	0.000 0

对比式(5)与表5可以看出,仅用模糊理论对

XLPE电缆的绝缘状态进行初步诊断, 信任程度较低, 精度也不高; 而利用该评估模型进行绝缘参数综合利用后, XLPE电缆绝缘状态属于“良”的可信度增加了, 属于其他绝缘状态的可信度降低了, 此评估结果符合江西省某隧道内连接两变电所的10 kV XLPE电缆实际绝缘情况, 该电缆线路在运行的两年中未发生过绝缘故障。

本实例若只利用介质损耗角正切 $\tan \delta$ 与直流泄漏电流 I 按照绝缘判据^[19]进行该条XLPE电缆的单一绝缘参数诊断, 则存在无法判断电缆绝缘状态的问题(介质损耗角正切 $\tan \delta$ 判断电缆绝缘状态为“良”, 而直流泄漏电流 I 判断为“中”), 因此, 更验证了多绝缘参数综合评估方法的有效性。

4 结语

提出了针对XLPE电缆的多绝缘参数综合评估方法, 将模糊理论与D-S证据理论结合, 建立了基于模糊理论的证据综合评估模型, 该模型利用模糊集合与隶属度函数确定各绝缘参数信度函数分配, 克服了传统证据理论存在的各证据体可信度分配难以确定的问题, 实例验证了该评估模型的有效性, 为XLPE电缆的绝缘诊断提供了一种新的研究思路。

值得一提的是, 随着在线监测技术的不断发展, XLPE电缆的绝缘监测参量将不断趋于丰富和精确, 在以后的研究中考考虑加入绝缘电阻、局部放电量等重要参数无疑会对XLPE电缆绝缘综合评估结果的准确度具有更大提升。

参考文献

- [1] 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.
LI Hong-lei, ZHANG Li, LI Li-hua. Online monitoring and detection techniques of XLPE cables[J]. Electric Power, 2010, 43(12): 31-34.
- [2] AKAYAMA T N. On-line cable monitor developed in Japan[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1359-1365.
- [3] VAHEDY V. Polymer insulated high voltage cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2006, 22(3): 13-18.
- [4] 董小兵, 蔡军, 江秀臣, 等. 10~35 kV XLPE电缆在线监测技术[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 20-24.
DONG Xiao-bing, CAI Jun, JIANG Xiu-chen, et al. On-line monitoring for 10~35 kV XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 20-24.
- [5] 张佩, 赵书涛, 申路, 等. 基于改进EEMD的高压断路器振声联合故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 77-81.
ZHANG Pei, ZHAO Shu-tao, SHEN Lu, et al. Research on vibration and acoustic joint mechanical fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on improved EEMD[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 77-81.
- [6] 龚瑞昆, 马亮, 赵延军, 等. 基于量子神经网络信息融合的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 79-84.
GONG Rui-kun, MA Liang, ZHAO Yan-jun, et al. Fault diagnosis for power transformer based on quantum neural network information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 79-84.
- [7] 王峰, 王成, 程剑兵, 等. 基于模糊理论输电线路舞动状态评估[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 69-75.
WANG Feng, WANG Cheng, CHENG Jian-bing, et al. Evaluation of transmission line galloping state based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 69-75.
- [8] 李永德, 李红伟, 张炳成, 等. 融合粗糙集与神经网络的燃气轮发电机组振动故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 90-94.
LI Yong-de, LI Hong-wei, ZHANG Bing-cheng, et al. Fault diagnosis of gas turbine generator set by combination of rough sets and neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 90-94.
- [9] 宋功益, 王晓茹, 周曙. 基于贝叶斯网的电网多区域复杂故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 20-25.
SONG Gong-yi, WANG Xiao-ru, ZHOU Shu. Research on complex faults diagnosis of multi-area power based on Bayesian networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 20-25.
- [10] 程加堂, 艾莉, 段志梅. 改进证据理论与神经网络集成的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 92-96.
CHENG Jia-tang, AI Li, DUAN Zhi-mei. Transformer fault diagnosis based on improved evidence theory and neural network integrated method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 92-96.
- [11] 王红新, 程树康, 文习山, 等. XLPE老化过程中交流绝缘参数特性[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 7-9.
WANG Hong-xin, CHENG Shu-kang, WEN Xi-shan, et al. AC insulation characteristics of XLPE in the course of aging[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 7-9.
- [12] 罗华煜, 关根志, 易小羽. 基于接地线电流法的电力电缆绝缘在线监测[J]. 高电压技术, 2005, 31(11):

- 63-65.
LUO Hua-yu, GUAN Gen-zhi, YI Xiao-yu. Study of on-line monitoring of XLPE cable by earth line current method[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 63-65.
- [13] 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.
SUN Jian-tao, WEN Xi-shan, HU Jing, et al. On-line monitoring of multiple insulation parameters of high voltage cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 7-11.
- [14] 杨伟, 顾明星, 彭静萍, 等. 证据理论在电机故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 64-67.
YANG Wei, GU Ming-xing, PENG Jing-ping, et al. Application of evidence theory in fault diagnosis for electric machine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 64-67.
- [15] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [16] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- XIE Ji-jian, LIU Cheng-ping. Fuzzy mathematics method and its application[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.
- [17] 刘刚, 刘毅刚. 高压交联聚乙烯电缆试验及维护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
LIU Gang, LIU Yi-gang. High voltage XLPE cable test and maintenance technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [18] 吴广宁. 电气设备状态监测的理论与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
WU Guang-ning. Theory and practice of electrical equipment condition monitoring[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [19] 张海龙. 110~220 kV XLPE电缆绝缘在线检测技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.
ZHANG Hai-long. 110~220 kV XLPE cable insulation on-line monitoring technique[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009.

收稿日期: 2014-01-26; 修回日期: 2014-05-13

作者简介:

夏向阳(1968-), 男, 博士后, 教授, 研究方向为电力设备故障诊断和分布式发电技术等; E-mail: xia_xy@126.com

张琦(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电缆绝缘故障诊断等。E-mail: 155187340@qq.com