

DOI: 10.7667/PSPC161077

基于信息融合的预装式变电站健康状态评估

苗红霞, 萧旋旋, 江冰, 胡钢

(河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213000)

摘要: 预装式变电站将气体绝缘组合电器设备(GIS)、变压器、低压开关柜和二次设备等作为模块集成在一组外壳内, 使得整个变电站成为了一个产品, 故对预装式变电站的整站状态评估成为可能。提出了基于信息融合的评估方法。首先用多层模糊综合评价法、BP神经网络和灰色关联法三种方法对预装式变电站中的GIS、变压器、低压开关柜和二次设备四大模块进行状态评估。再利用DS合成法则将三种方法得出的评估结果进行融合, 分别得出各个模块的综合评估结果。最后将这四大模块作为预装式变电站的评价因素, 使用单层模糊综合评价法对整站进行状态评估。仿真结果表明, 该方法能正确评估出预装式变电站整站的健康状态。

关键词: 预装式变电站状态评估; 信息融合; 模糊综合评判; 神经网络; 灰色关联

State evaluation of prefabricated substation based on information fusion

MIAO Hongxia, XIAO Xuanxuan, JIANG Bing, HU Gang

(College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China)

Abstract: Prefabricated substation is composed of four modules, which are insulated switchgear, transformers, low voltage switch cabinet and secondary equipment, making the whole substation become a product, so it's possible to assess the overall status of it. In this paper, an evaluation method based on information fusion is proposed. The multilayer fuzzy comprehensive evaluation method, BP neural network and grey correlation method are used to assess the four modules to get the evaluation results. Then, the DS combination rule is used to fuse the evaluation results. Finally, the fuzzy comprehensive evaluation method is used again to assess the status of the prefabricated substation based on the four modules evaluation results. Simulation results show that the proposed method can correctly evaluate the operating status of the preinstalled substation.

Key words: state evaluation of prefabricated substation; information fusion; fuzzy comprehensive evaluation; neural network; grey correlation

0 引言

传统的变电站占地面积大、设备集成度小, 而预装式变电站具有体积小、可选择性大、现场安装量小以及安装调试周期短等优点, 因此近年来在国内得到广泛的应用。预装式变电站的健康状况对整个电网的运行有着举足轻重的作用, 故对其进行正确的状态评估意义重大^[1]。目前对变电站的状态评估主要集中在对其中的变压器、开关柜等单一设备的评估。文献[2-3]采用模糊综合评价法评估了GIS和变压器的健康状态。文献[4]采用人工神经网络和

信息融合技术实现了对变压器的状态评估; 文献[5]将支持向量机与模糊综合评判方法相结合评估了变电站二次设备的状态; 文献[6]用模糊综合评判法、马尔科夫预测法和隐藏故障法分别对二次设备状态进行了状态评估, 并用DS证据理论对评估的结果进行了融合, 实现了对二次设备的状态评估。

对变电站中单一设备的状态评估已有多种方法, 有使用单一方法对设备进行评估^[7-12], 有使用信息融合的方法对单一设备进行评估^[13-16]。但目前随着内部模块化的集成, 预装式变电站已作为一个产品, 对该产品进行整站的健康状态评估, 目前尚未见文献报道, 故本文旨在研究一种实用、可靠的预装式变电站健康状态评估模型和算法。

1 基于信息融合的预装式变电站健康状态评估模型

预装式变电站主要由气体绝缘组合电器设备(GIS)、变压器、低压开关柜和二次设备四个模块组成,其健康状态评估模型如图1所示。每个模块先用模糊综合评判法、神经网络和灰色关联理论三种方法对其进行评估,再使用DS证据理论将三种方法的评估结果进行融合,得出每个模块的最终评估结果。在此基础上,将这四大模块作为预装式变电站的评价因素,使用单层模糊评判法实现对整站的健康状态评估。

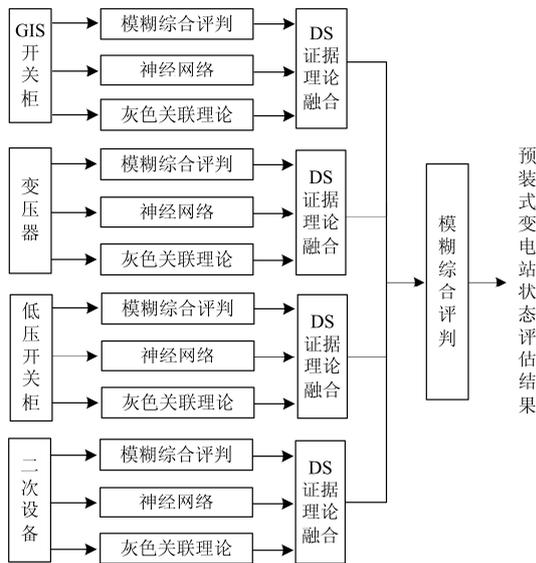


图1 预装式变电站状态评估模型图

Fig. 1 State evaluation model of prefabricated substation

2 基于信息融合的预装式变电站健康状态评估算法

要实现预装式变电站的状态评估,首先要对变电站中GIS、变压器、低压开关柜和二次设备进行评估,四个模块所用评估算法相同,均是分别用三种方法先进行评估,再使用DS证据理论将三种方法的评估结果进行融合,因此本文以GIS模块为例进行阐述。

2.1 选取评价因素

采用模糊综合评判法^[17]、神经网络和灰色关联理论三种方法对GIS进行评估,都需要选取评价因素。选取时,要求评估指标全面真实地反映设备的运行状态,而且要考虑实际可操作性。

本文从GIS的绝缘特性、断路器、隔离接地开关以及维修记录四个方面选取评价因素。具体如图2所示。

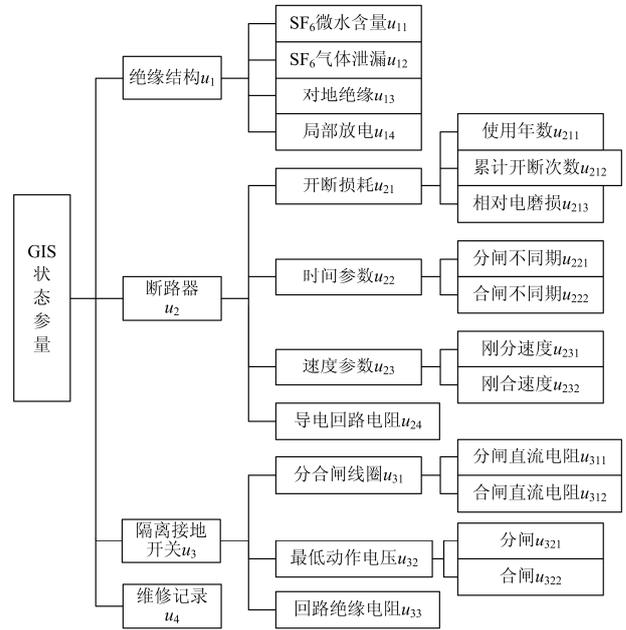


图2 GIS评价因素

Fig. 2 Evaluation factors of GIS

2.2 基于模糊综合评判法的GIS状态评估

考虑到各种评价因素对评估结果的影响,采用多级模糊综合评价法。具体实现步骤如下所述。

Step1: 建立评判对象的因素集。

对于GIS使用三层模糊评价法,如图2所示。上一层因素由下一层因素所决定,绝缘结构、断路器、隔离接地开关和维修记录为第一层因素,由第二层因素决定。如绝缘结构由SF6微水含量、SF6气体泄漏、对地绝缘电阻和局部放电结果决定。

Step2: 建立评语集。

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ 为各种可能的评估结果,本文选取健康状态 v_1 、亚健康状态 v_2 、故障早期状态 v_3 、故障晚期状态 v_4 作为评语集。

Step3: 确定各级评判因素的权重。

根据各层中各因素的重要程度,可以得到各个因素的权重集。本文采用层次分析法^[7]求解权重值,即构造判断矩阵 M 代表因素集中 u_i 对 u_j 的相对重要性数值,求出 M 矩阵的最大特征根对应的特征向量,当特征向量通过一致性校验后,即作为权重。表1为GIS中评价因素对应的权重。

Step4: 建立各层次模糊评判矩阵。

模糊评判矩阵 $R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}\}$ 为第 i 个评价因素对于状态 v_j 的隶属度。图2中局部放电、回路绝缘电阻和维修记录为定性因素,采用模糊统计实验法确定评判矩阵,其余为定量因素,采用隶属函数来确定评判矩阵。而定性因素则采用模糊统计试

验法来确定矩阵。

表 1 评价因素权重表

Table 1 Evaluation factor weight

因素	下层子因素权重	因素	下层子因素权重
U	(0.4741, 0.2558, 0.1323, 0.1378)	U_{21}	(0.1512, 0.0905, 0.7582)
U_1	(0.2007, 0.1207, 0.0744, 0.0642)	U_{22}	(0.45, 0.55)
U_2	(0.0642, 0.2007, 0.1207, 0.0744)	U_{23}	(0.4, 0.6)
U_3	(0.5279, 0.3325, 0.1396)	U_{31}	(0.6667, 0.3333)
U_4	(1)	U_{32}	(0.3333, 0.6667)

Step5: 确定模糊算子和处理评价指标。

在模糊综合评判表达式 $B = A \circ R$ 中, “ \circ ” 为广义模糊算子, 本文选择加权平均型的综合评判, 既考虑了主要因素对设备状态的影响, 又保留了单个因素的全部信息。选用最大隶属度法, 取与 b_{\max} 相对应的评价集元素 v_i 作为最终评估结果。

2.3 基于神经网络的 GIS 状态评估

BP 网络是一种按误差反向传播算法训练的多层前馈网络, 能学习和存储大量的输入—输出模式映射关系, 无需构建数学方程。利用 GIS 的历史运行信息训练神经网络模型, 使模型能对当前的运行状态进行评估, 主要步骤如下所述。

Step1: 确定神经网络的输入和输出。选取的输入变量为图 2 所示 GIS 的评价因素, 输出为 2.2 节中四种评估状态的隶属度。

Step2: 对输入数据进行归一化处理。使用模糊综合评价模型中的相对劣化度来对输入数据进行归一化, 取值为 $[0, 1]$ 。

Step3: 设置神经网络工具箱的基本参数。

设置神经网络的训练最大迭代次数为 1000, 目标误差为 $1e-5$, 学习率为 0.01, 当迭代次数允许的范围內达到目标误差时, 即停止训练, 表明网络训练成功, 反之则需要重新训练。

Step4: 训练与仿真。使用 train 函数训练神经网络模型, sim 函数进行仿真。

2.4 基于灰色关联的 GIS 状态评估

灰色关联分析法的基本思想是根据比较数列集构成的曲线与参考数列构成的曲线之间的几何相似程度, 来确定比较数列集与参考数列之间的关联度。

利用灰色关联分析进行 GIS 的状态评估主要步骤如下所述。

Step1: 收集评价数据, 确定原始评价矩阵及参考数列。在本文中, 评价矩阵即为待测评运行数据, 参考数列为每个评价等级中最优值构成的矩阵。定量评价因素如图 2 所示, 共有 15 个, 有 1 组待评判数列和 4 个等级数列, 构成 5×15 的原始评价矩阵 X 。

Step2: 对数据进行标准化处理得到标准化矩阵 $newX$ 。

对于不同的指标类型, 采取不同的标准化处理策略。GIS 评价因素中断路器刚分/刚合速度以及隔离接地开关中分/合闸线圈的最低动作电压的最优值在一定的区间内, 所以采用最优值为给定区间的标准化方法, 其他评价因素为线性变化, 采用标准 0-1 变换(极差变换法), 得到标准化矩阵 $newX = \{x_{ij}, i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, 15\}$ 。

Step3: 计算关联系数

$$rel = \frac{\min AbsValue + defC * \max AbsValue}{absValue + defC * \max AbsValue} \quad (1)$$

式中: rel 表示关联系数; $absValue$ 为标准化矩阵 $newX$ 中待评价数组与参考数组的绝对差值序列, $absValue(i) = abs(newX(i) - newX(0)), i = 1, 2, \dots, 4$ (2)

$\min absValue$ 和 $\max absValue$ 为 $absValue$ 的最小值和最大值, $defC \in (0, 1)$ 为分辨系数, 本文取 $defC = 0.5$ 。

Step4: 计算关联度

$$p = rel \times w \quad (3)$$

式中: w 为每一个评价因素的权重, 本文采用熵权法来确定 w 。 m 项指标, n 个评价对象中

$$w_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{j=1}^m H_j}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

$$f_{ij} = newX_{ij} / \sum_{i=1}^n newX_{ij} \quad (6)$$

式中: $0 \leq w_j \leq 1$ 且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$; H_j 为第 j 项指标的熵值, $k = 1 / \ln n$ 。

2.5 基于 DS 证据理论的信息融合算法

DS 合成法是一个反映证据联合作用的法则。设 $Bel1$ 和 $Bel2$ 是同一识别框架 U 上的两个信任函数, 同时 m_1 和 m_2 是其对应的基本信度分配, 焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_n 和 B_1, B_2, \dots, B_n , 若 $C \in U$ 且 $A_i \cap B_j = C$, 则 C 的基本信度值为

$$m(C) = \begin{cases} k \times \sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j) & \forall C \in U, C \neq \emptyset \\ 0 & C = \emptyset \end{cases} \quad (7)$$

式中, k 为归一化系数, $k = \frac{1}{1 - k_1}$, $k_1 =$

$$\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j) < 1。$$

2.6 基于四个模块的整站状态综合评估算法

在得出每个模块的综合评估结果后，再次使用单层模糊综合评价法，即将四个模块作为第一层评价因素，对其分配权重，并将其综合评价结果作为评价矩阵，得出预装式变电站的整体状态评估结果。

3 预装式变电站状态评估结果与分析

本节先以 GIS 为例进行分析，再评估整个预装式变电站的健康状态。

3.1 GIS 状态评估结果与分析

GIS 某次实际运行记录为：SF₆ 微水含量为 163 ppm，SF₆ 微水泄漏 0.48 μl/l，对地绝缘电阻为 7500 MΩ，断路器工作 8 年，累计动作次数 287 次，相对磨损度为 0.32，其合闸不同期和分闸不同期都为 1.3 ms，刚分速度为 3.4 m/s，刚合速度为 3.3 m/s，导电回路电阻为 35 μΩ；隔离接地开关分/合闸线圈直流电阻为 104 Ω和 117 Ω，最低动作电压为 112 V 和 132 V。

1) 模糊综合评价评估结果

(1) 评判矩阵

定量因素求评判矩阵引入相对劣化度，相对劣化度为设备当前实际状态与故障状态相比的相对劣化程度，取值为[0, 1]。以绝缘性能中 SF₆ 微水含量为例，在《电力设备预防性试验规程》规定^[18]，SF₆ 微水含量运行中不大于 300 ppm，所以可设其劣化函数为： $f(x) = \exp(\frac{x-300}{300})$ ；其对应的隶属函数如表 2 所示。当实际测量值为 163 ppm 时，其评判矩阵为： $R_{u_1} = [0.0123 \ 0.6043 \ 0.0496 \ 0]$ 。

定性因素求评判矩阵采用模糊统计法，以局部放电为例，参评的专家为 20 人，其记录情况见表 3。认为局部放电结果为健康状态的有 10 人，所以健康状态的隶属度为 0.5，同理亚健康状态隶属度为 0.5，故障早期和晚期的隶属度分别为 0.1 和 0，所以局部放电对应的评判矩阵为 $R_{u_4} = [0.5 \ 0.4 \ 0.1 \ 0]$ 。

表 2 SF₆ 微水含量隶属函数

Table 2 Membership function of SF₆ micro water content

评语	SF ₆ 微水含量隶属度	评语	SF ₆ 微水含量隶属度
健康	$u_{11} = \begin{cases} 1 & x < 0.5 \\ \left(\frac{0.65-x}{0.15}\right)^2 & 0.5 \leq x \leq 0.65 \\ 0 & x > 0.65 \end{cases}$	亚健康	$u_{11} = \begin{cases} \left(\frac{x-0.5}{0.1}\right)^2 & 0.5 \leq x < 0.6 \\ \left(\frac{0.75-x}{0.15}\right)^2 & 0.6 \leq x \leq 0.75 \\ 0 & x < 0.5, x > 0.75 \end{cases}$
故障早期	$u_{11} = \begin{cases} \left(\frac{x-0.6}{0.1}\right)^2 & 0.6 \leq x < 0.75 \\ \left(\frac{0.9-x}{0.15}\right)^2 & 0.75 \leq x \leq 0.9 \\ 0 & x < 0.6, x > 0.9 \end{cases}$	故障晚期	$u_{11} = \begin{cases} 0 & x < 0.7 \\ \left(\frac{x-0.7}{0.2}\right)^2 & 0.7 \leq x \leq 0.9 \\ 1 & x > 0.9 \end{cases}$

表 3 局部放电情况统计

Table 3 Statistics of partial discharge

评语	评判标准	人数
健康	现场检测无局部放电信号	10
亚健康	现场检测基本没有或有微弱放电信号	8
故障早期	现场检测有明显局部放电信号	2
故障晚期	现场检测有强烈局部放电信号	0

当计算出 SF₆ 微水含量、SF₆ 气体泄漏、对地绝缘电阻和局部放电的评价矩阵后，可求出上一层因素绝缘性能的评判矩阵为

$$R_{u_1} = \begin{bmatrix} 0.0123 & 0.6043 & 0.0496 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5378 & 0 \\ 0.2184 & 0.2837 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

同理可求出其他因素的评判矩阵。

(2) 评估结果

对于绝缘性能的子因素，其权重为： $A_{u_1} = [0.2007 \ 0.1207 \ 0.0744 \ 0.0642]$ ，可得绝缘性能的评估结果为 $B_{u_1} = A_{u_1} \circ R_{u_1} = [0.3209 \ 0.3870 \ 0.1355 \ 0]$ 。

同理可求得断路器、隔离接地开关和维修记录的评估结果。

断路器： $B_{u_2} = [0.4104 \ 0.4782 \ 0.0165 \ 0.0009]$ ；

隔离接地开关： $B_{u_3} = [0.6151 \ 0.1347 \ 0.0279 \ 0]$ ；

维修记录： $B_{u_4} = [0.55 \ 0.35 \ 0.1 \ 0]$ 。

因此 GIS 的总体评价为

$$B_u = A_u \circ R_u = A_u \circ [B_{u_1} \ B_{u_2} \ B_{u_3} \ B_{u_4}]^T = [0.4749 \ 0.4263 \ 0.0985 \ 0.0003]$$

根据隶属度最大原则结合评语集, 当前 GIS 处于健康状态, 向亚健康状态发展。

2) 神经网络评估结果

选取 24 组数据作为训练样本, 由图 3 可知当迭代 10 次时, 误差期望值达到要求的 $1e-5$, 网络训练成功。将上文中某次运行记录代入训练好的网络中, 得到实验结果如表 4 所示, 根据隶属度最大原则可知 GIS 处于健康状态。

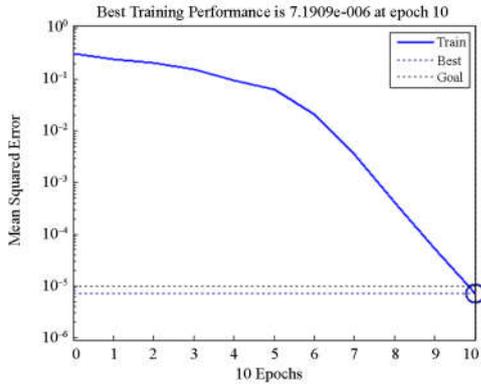


图 3 神经网络训练结果图

Fig. 3 Training results of neural network

表 4 神经网络评估结果

Table 4 Evaluation results of neural network

健康	亚健康	故障早期	故障晚期
0.7596	0.2402	0.0002	1e-5

3) 灰色关联评估结果

经过仿真实验, GIS 中评价因素的权重分配如表 5 所示。

表 5 熵权法所得评价因素权重

Table 5 Weight of factors based on entropy weight method

评价因素	1	2	3	4	5
w	0.1168	0.0759	0.1818	0.1565	0.0986
评价因素	6	7	8	9	10
w	0.0711	0.0723	0.0511	0.0012	0.0001
评价因素	11	12	13	14	15
w	0.06	0.0004	0.0004	0.0549	0.0549

评估结果如图 4 所示, 根据最大隶属度原则, GIS 此时处于健康状态。

4) DS 证据融合结果

表 6 记录了三种方法的评估结果以及用 DS 法则融合后的结果。从表 6 可看出, 融合后健康状态的隶属度增大, 其他状态的隶属度减小, 故障状态隶属度几乎为零, 从而可以得出此时 GIS 处于健康状态。

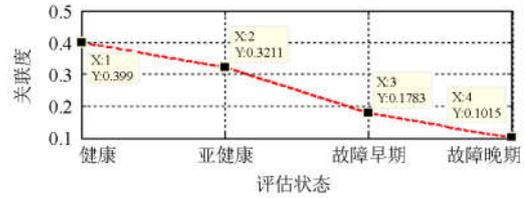


图 4 灰色关联综合评价结果图

Fig. 4 Comprehensive evaluation results of grey relation

表 6 评估结果

Table 6 Evaluation results

	健康	亚健康	故障早期	故障晚期
模糊综合评价	0.4749	0.4263	0.0985	0.0003
神经网络	0.7596	0.2402	0.0002	1e-5
灰色关联	0.3990	0.3211	0.1783	0.1015
前两种方法融合结果	0.7789	0.2211	4.25e-5	6.48e-9
三种方法融合结果	0.8139	0.1858	2.9e-5	6.35e-9

模糊综合评判法中评价因素的权重受到人为因素的影响, 主观性较大, 若只采用模糊综合评判法, 此时 GIS 亚健康状态的隶属度也很大, 无法准确地判断出其真实状态。将其与神经网络的结果相融合, 可以进一步确定 GIS 状态。但是若评价因素中有一个因素处于一般甚至故障晚期状态, 其他因素处于健康状态, 则使用神经网络方法很难得出此时有零件损坏, 不能及时准确地判断状态。灰色关联理论对每个因素都求取关联度, 可进一步弥补前两种融合后的状态信息, 得出设备的运行状态。

3.2 对整站的综合评估结果

用同样的方法对图 1 所示的其他三个模块分别进行状态评估, 结果如表 7 所示。

表 7 四大模块评估结果

Table 7 Evaluation results of the four modules

	健康	亚健康	故障早期	故障晚期
变压器	0.6402	0.3015	0.05	0.0081
GIS	0.8139	0.1858	2.9e-5	3.35e-9
低压开关柜	0.5218	0.3782	0.0981	0.0019
二次设备	0.8250	0.1140	0.0058	0.0552

对预装式变电站中的四大模块设置权重为: $A = [0.3 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.2]$, 所以其整站评估结果为: $B = [0.7055 \ 0.2446 \ 0.036 \ 0.014]$, 此时预装式变电站处于健康状态。

为了能够方便、及时地显示各个模块和整个变电站的健康状况, 本文用 c# 语言建立了预装式变电站健康评估界面。图 5 显示了 4 个模块信息融合后的健康情况以及整个变电站的健康情况。当单点点击对应模块按钮后, 会进入相应的子模块评估系统,

图 6 为其中的 GIS 模块的评估子界面。图 6 中显示了各参数的正常范围和当前值以及各种方法进行评估的结果。对 GIS 进行状态评估的结果可返回到图 5 对应的评估结果位置。



图 5 预装式变电站健康评估系统主界面

Fig. 5 Main interface of prefabricated substation health evaluation system



图 6 GIS 健康评估系统界面

Fig. 6 Interface of GIS health evaluation system

4 结论

本文建立了预装式变电站的健康状态评估模型，先用模糊综合评判法、神经网络和灰色关联法对预装式变电站中的 GIS、变压器、低压开关柜和二次设备进行状态评估；再利用 DS 合成法则将评估结果进行融合，得出设备的综合评估结果；最后使用单层模糊综合评判法将四个模块作为评价因素，得出了预装式变电站整站的综合运行状态。通过实例验证了该状态评估模型的可行性及状态评估算法的有效性。

参考文献

[1] 王涛, 张尚, 顾雪平, 等. 电力系统运行状态的趋势辨识[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 171-180.
WANG Tao, ZHANG Shang, GU Xueping, et al. Trends identification of power system operating states[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015,

30(24): 171-180.
[2] 陈朋永. 基于层次分析的 GIS 运行状态模糊综合评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
CHEN Pengyong. Gas insulated switchgear running state comprehensive evaluation based on analytic hierarchy process of fuzzy theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
[3] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 70-75.
[4] 阮玲, 谢齐家, 高胜友, 等. 人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 822-828.
RUAN Ling, XIE Qijia, GAO Shengyou, et al. Application of artificial neural network and information fusion technology in power transformer condition assessment[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 822-828.
[5] 马博, 董海鹰, 任伟. 基于模糊综合支持向量机的特高压变电站二次设备状态评估[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(9): 191-197.
MA Bo, DONG Haiying, REN Wei. Status assessment of UHV substation secondary equipment based on fuzzy comprehensive support vector machine method[J]. Computer Systems & Applications, 2014, 23(9): 191-197.
[6] 王晓亮, 董海鹰, 任伟. 基于信息融合的 750kV 电网二次设备状态评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 40-46.
WANG Xiaoliang, DONG Haiying, REN Wei. State evaluation of secondary device in 750 kV power grid based on information fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(1): 40-46.
[7] CHANG F Y, LI E X, SHENG W X, et al. A method of the switchgear state estimation based on the hidden Markov model[C] // Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 International Symposium on: IEEE, 2015: 14-19.
[8] 廖瑞金, 刘捷丰, 杨丽君, 等. 电力变压器油纸绝缘状态评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 247-254.
LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, YANG Lijun, et al. Investigation on frequency domain dielectric characteristics for condition assessment of transformer oil-paper insulation[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 247-254.

- [9] MA Z, DANG S, GHOLAMZADEH A, et al. Operational state diagnosis algorithm of the oil-immersed transformer based on fuzzy synthetic evaluation model[C] // 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2014: 848-851.
- [10] DMITRIEV S A, KHALYASMAA A I. Power equipment technical state assessment principles[C] // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2014, 492: 531-535.
- [11] 郑含博. 电力变压器状态评估及故障诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHENG Hanbo. Study on condition assessment and fault diagnosis approaches for power transformers[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [12] 薛浩然, 张珂珩, 李斌, 等. 基于布谷鸟算法和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 8-13.
XUE Haoran, ZHANG Keheng, LI Bin, et al. Fault diagnosis of transformer based on the cuckoo search and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 8-13.
- [13] 张桦, 魏本刚, 李可军, 等. 基于变压器马尔可夫状态评估模型和熵权模糊评价方法的风险评估技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 134-140.
ZHANG Hua, WEI Bengang, LI Kejun, et al. Research on risk assessment technology based on Markov state evaluation model for power transformer and entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 134-140.
- [14] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等. 基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 115-120.
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.
- [15] 陈发广, 周步祥, 曾澜钰. 基于多信息融合的变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 140-144.
CHEN Faguang, ZHOU Buxiang, ZENG Lanyu. State Evaluation model of transformer operation based on multi-information fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2013, 25(4): 140-144.
- [16] 律方成, 金虎, 王子建, 等. 基于主成分分析和多分类相关向量机的 GIS 局部放电模式识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 225-231.
LU Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. GIS partial discharge pattern recognition based on principal component analysis and multiclass relevance vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 225-231.
- [17] 杨林, 白玉慧, 仝凤鸣, 等. 基于模糊神经网络模型的中国电力装备制造产业安全评价研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 1-8.
YANG Lin, BAI Yuhui, TONG Fengming, et al. Safety evaluation of china's power equipment manufacturing industry based on fuzzy neural network model[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 1-8.
- [18] 彭积城, 蔡金锭. 变压器油纸绝缘老化状态的探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 132-138.
PENG Jicheng, CAI Jinding. Discussion on evaluation of aging condition for transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 132-138.

收稿日期: 2016-07-14; 修回日期: 2016-09-27

作者简介:

苗红霞(1968—), 女, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: houxz1970@163.com

萧旋旋(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: xuan284404572@163.com

(编辑 姜新丽)