

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.042

基于正态云模型和 D-S 证据理论的开关柜运行状态综合评估

贾亚楠¹, 刘东明², 随慧斌¹

(1. 山东大学电气工程学院, 济南 250061; 2. 国网山东电力集团公司烟台供电公司, 山东 烟台 264000)

摘要: 以高压开关柜为研究对象, 提出了一种基于正态云模型和 D-S 证据理论的分层评估算法。通过对影响开关柜运行状态的指标进行聚类分层, 运用正态云模型确定各指标与各评价等级的关联度, 并利用改进的模糊算法进行第 1 层评估, 在此基础上运用 D-S 证据理论对开关柜整体运行状态进行评估。采用 KYN28A-12 型号某开关柜的一次检测数据为例, 通过实例验证证明了评估算法的有效性。该评估模型结构清晰, 评价指标易于得到, 为开关柜状态评估提供了一种新思路。

关键词: 开关柜; 状态评估; 正态云模型; 最优组合权重; D-S 证据理论

Comprehensive Evaluation for Switchgear Based on the Normal Cloud Model and D-S Evidence Theory

JIA Yanan¹, LIU Dongming², SUI Huibin¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Yantai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Group Corporation, Shandong Yantai 264000, China)

Abstract: Taking the high-voltage switchgear cabinet as the studying object, a hierarchical evaluation method based on normal cloud model and D-S evidential theory is proposed. By hierarchical clustering indicators of the switchgear status, normal cloud model is used to determine the correlation degree of indicators and evaluation level. Also the improved fuzzy algorithm is used to evaluate the first layer. On the basis, D-S evidential theory is used to assess the overall state of the switchgear. As an example, test data of the KYN28A-12 model switchgear is analyzed. The simulation result demonstrates the effectiveness of the assessment algorithm. The assessment model is clear and doesn't need lots of historical data. It offers a new thinking to assess the operating state of the high-voltage switchgear.

Key words: high-voltage switchgear; state assessment; normal cloud model; optimized combination weighting; D-S evidential theory

0 引言

高压开关柜是电能配送、控制、测量等功能的枢纽, 其良好的运行状态对电网的安全稳定运行非常重要^[1]。状态检修是维护高压开关柜良好运行的重要手段^[2-3], 而对高压开关柜进行状态评估又是状态检修的必要前提。但高压开关柜的系统结构比较复杂且状态信息量较多, 虽然这些状态信息量从不同层面反映了高压开关柜的运行状态, 然而由于测量的不精确、评判标准的不完善, 造成高压开关柜状态评估存在很大的不确定性。

文[3]通过对 10 kV 和 35 kV 高压开关柜带电检测和巡检获得数据, 利用故障树分析方法分析了开关柜故障事件的发生概率, 以及开关柜中部件故障事件对开关柜故障的影响; 文[4]在开关柜现场检测手段和检测规程的基础上, 依据数据信息的形式不同, 结合了设备评分的方法, 提出了一种分层模糊综合评价方案。但是这种方法仅仅涉及了不确定性的模糊性, 而忽视了随机性对评估结果的影响。

云模型考虑了客观世界中事物或人类知识中概念的 2 种不确定性: 模糊性和随机性, 并把二者完全集成在一起, 构成定性和定量相互间的映射^[5]。这种模型符合不同开关柜的不同运行工况, 以及状态信

收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-04-20

息测量误差随机性的事实。

文中依据开关柜的状态信息类型不同,对各种信息进行分类,并将开关柜的状态评估分为2个层次,充分考虑评估过程中存在的模糊性和随机性等不确定性问题,并运用最优权重方法对各指标进行赋权,建立了基于正态云模型和D-S证据理论的开关柜运行状态评估模型。

1 状态评估的整体结构

1.1 评价指标选择与运行状态等级设定

为了对开关柜运行状态尽可能的进行准确评估,在参考了国家电网公司的Q/GDW 613—2011标准《12(7.2) kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备状态评价导则》和前人的研究成果^[2-4,6-7]的基础上,对影响开关柜评价的指标进行了选取,构建了开关柜的评估指标体系见图1。

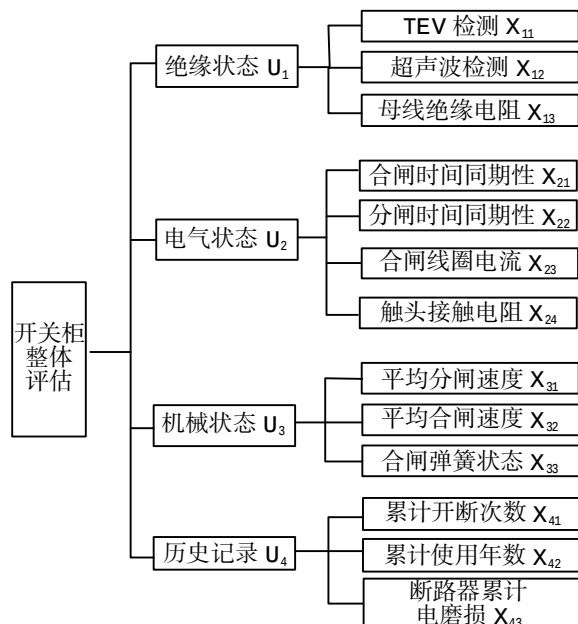


图1 开关柜状态评估指标体系

Fig. 1 Indicator category of condition assessment for switchgear

由于选取的评估指标存在数量较多且等级、单位不尽相同等因素,需要对各指标进行归一化处理。本文采用相对劣化度的方法进行归一化^[8-9]。

对于数值越大越好的指标,其检测数据按式(1)进行归一化处理

$$x = \begin{cases} 0 & X \geq X_{\max} \\ \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} & X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \\ 1 & X \leq X_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: x 表示归一化后的指标数值; X 表示指标测量的原始数据; $X_{\min}$ 表示开关柜安全运行标准限值的下限; $X_{\max}$ 表示开关柜出厂时的指标检测数

值或理想状态下的数值。

对于数值居中越好的指标,其检测数据按式(2)进行归一化处理

$$x = \begin{cases} \frac{X_1 - X}{X_1 - X_{\min}} & X \in [X_{\min}, X_1) \\ 0 & X \in [X_1, X_2] \\ \frac{X - X_2}{X_{\max} - X_2} & X \in (X_2, X_{\max}] \\ 1 & X \notin [X_{\min}, X_{\max}] \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $[X_1, X_2]$ 表示指标的状态最良好的区间数值, $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别表示开关柜安全运行标准限值的下限和上限。

对于数值越小越好的指标,其检测数据按式(3)进行归一化处理

$$x = \begin{cases} 0 & X \leq X_{\min} \\ \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \\ 1 & X \geq X_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $X_{\max}$ 表示开关柜安全运行标准限值的上限; $X_{\min}$ 表示为开关柜出厂时的指标检测数值或理想状态下的数值。

目前还没有一个统一的标准对开关柜运行状态等级进行划分。参考《12(7.2) kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备状态评价导则》,将开关柜的运行状态划分成4个等级,见表1。

表1 不同相对劣化度与评估等级对应关系

Table 1 Assessment level of different relative deterioration degree

相对劣化度	运行状态和维修建议
[0.0, 0.2)	开关柜运行状态良好,可适当延长检修计划
[0.2, 0.5)	开关柜运行状态基本正常,但是有向标准限值靠近的趋势,应加强运行监视,正常按计划检修。
[0.5, 0.8)	开关柜存在事故隐患,还可以短期带故障运行,应适时安排停电检修。
[0.8, 1.0]	开关柜存在重大事故隐患,需要进行复测或其他检测手段进行故障确认并及时进行停电维修。

1.2 开关柜状态评估结构

建立2个层次的开关柜状态评估体系见图2。图2中:第1层为子系统评估,包含绝缘状态、电气状态、机械状态以及历史记录等子系统评估,该层根据检测的指标数据对相关的子系统状态进行评估;第2层为开关柜整体评估,融合子系统的评估结果对开关柜整体运行状态进行评估。其中 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 为开关柜的4个运行状态等级。

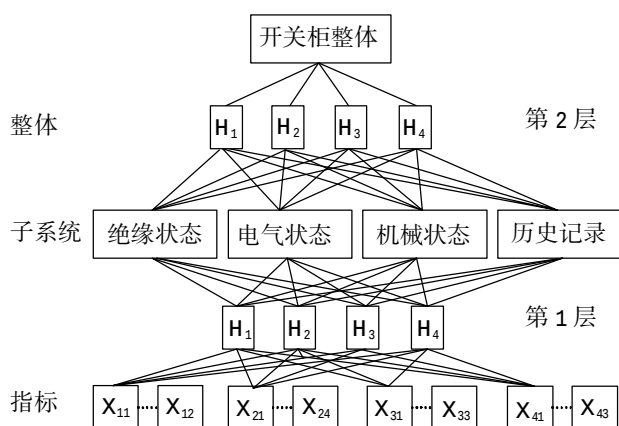


图 2 开关柜状态评估结构

Fig. 2 Assessment structure of switchgear state

2 权重分配

2.1 最优权重理论

对不同评价指标进行合理的赋权是状态评估的关键,根据主客观权重赋权的方法,提出了一种综合主客观权重的最优组合权重赋权方法。

假设对指标进行主观和客观的赋权方法分别有 p 种和 q 种,并且每种方法都满足各指标的权重和为 1。设同一子系统包含 l 个评价指标,且最优组合权重 $\omega=[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l]$ 满足

$$\min H(\omega) = \alpha_k \sum_{i=1}^p (\omega_{ik} - \omega_k)^2 + \beta_k \sum_{j=1}^q (\omega_{jk} - \omega_k)^2. \quad (4)$$

式(4)中, α_k, β_k 分别表示主、客观赋权方法的相对重要程度。

根据矩估计理论, α_k, β_k 的取值由该指标主客观权重的期望计算得出

$$\begin{cases} \alpha_k = \frac{E(\omega_{ik})}{E(\omega_{ik}) + E(\omega_{jk})} \\ \beta_k = \frac{E(\omega_{jk})}{E(\omega_{ik}) + E(\omega_{jk})} \end{cases}. \quad (5)$$

进一步可求得同一子系统所有指标主客观权重的相对重要程度

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \alpha_k \\ \beta = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \beta_k \end{cases}. \quad (6)$$

由于每个指标的最优组合权重满足式(4)的同时还要满足 $\sum_{i=1}^l \omega_k = 1$, 即 ω_k 为同一子系统下所有指标的整体最优值,求解公式为

$$\begin{cases} \min H(\omega) = \alpha \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^p (\omega_{ik} - \omega_k)^2 + \beta \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^q (\omega_{jk} - \omega_k)^2 \\ \text{s.t.} \quad 0 \leq \omega_k \leq 1 \\ \sum_{i=1}^l \omega_k = 1 \end{cases}. \quad (7)$$

已知式(7)是一个非线性凸规划问题,可通过 Karush-Kuhn-Tucker 条件解出最优组合权重^[10]

$$\omega_k = \frac{\alpha \sum_{i=1}^p \omega_{ik} + \beta \sum_{j=1}^q \omega_{jk}}{\alpha p + \beta q}. \quad (8)$$

2.2 权重计算

模型第 1 层的最优权重采用主观赋权中的专家赋权法、客观赋权中的方差最大化赋权法和熵权法^[11-12],根据式(5)-(8)求得。因为缺少对应的客观数据,第 2 层中的开关柜的整体评价只进行主观赋权,其对评估结果产生的影响利用 D-S 证据理论方法进行消减。子系统各指标主观权重见表 2。第 2 层的开关柜的整体评价中各子系统采用专家赋权法,对应的权重为[0.172 7, 0.331 8, 0.290 9, 0.204 5]。

表 2 子系统各指标主观权重分配

Table 2 Subjective weights of each indicator

子系统	评价指标权重分配向量
U_1	[0.426 8, 0.182 9, 0.390 2]
U_2	[0.297 9, 0.268 0, 0.221 2, 0.212 8]
U_3	[0.378 4, 0.340 5, 0.281 1]
U_4	[0.281 0, 0.289 3, 0.429 8]

3 状态评估模型

3.1 基于正态云模型的子系统评估

3.1.1 正态云模型

正态云模型是定性概念与定量表示之间的不确定性转换模型,它兼顾了知识表示中的模糊性和随机性^[5,13]。

定义: 设 U 为一个用精确数值表示的定量论域, C 为 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$, 且 x 是定性概念 C 的一次稳定倾向的随机实现,假设 x 对 C 的关联度为 $\mu(x) \in [0, 1]$, 则称 $\mu(x)$ 在 U 上的分布为云模型。设 $N(A, B)$ 表示为满足期望值为 A 、标准差为 B 的正态分布随机函数, 则有:

$$x_i = N(Ex, En); \quad (9)$$

$$En' = N(En, He); \quad (10)$$

$$\mu_i = \exp[-(x_i - Ex)^2 / 2(En')^2]. \quad (11)$$

式(9)-(11)中: Ex 为期望值; En 为熵; He 为超熵,表示变量 μ_i 与 x_i 之间的关系。满足式(9)-(11)的数据对 $\text{drop}(x_i, \mu_i) (i=1, 2, \dots)$ 所构成的云模型称为正态云

模型,记为(Ex,En,He)。

将高压开关柜各状态等级相对劣化度界限值依据正态云模型进行扩展从而得到各等级的正态云模型,见表 3。

表 3 各等级对应的正态云模型
Table 3 Corresponding normal cloud model

评估等级	正态云模型
良好	(0.1,1/30,0.001)
一般	(0.35,1/20,0.002)
异常	(0.65,1/20,0.002)
严重	(0.9,1/30,0.001)

注:如果评价指标相对劣化度小于 0.1 时,对应各等级关联度向量为[1,0,0,0]。而相对劣化度大于 0.9 时,对应关联度向量为[0,0,0,1]。

得到的正态云模型下的关联度见图 3。

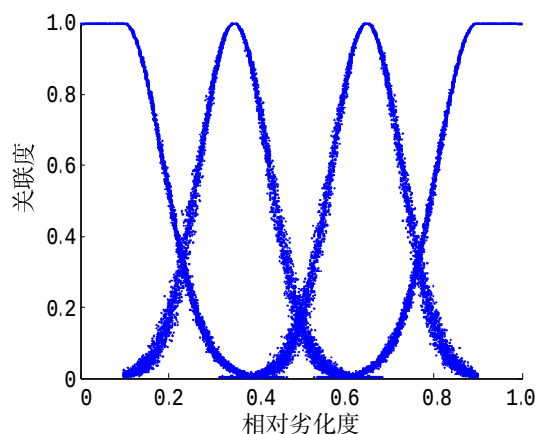


图 3 正态云模型下的关联度关系图

Fig. 3 Correlative Degree diagram of the normal cloud model

3.1.2 基于正态云模型的子系统评估

对于某指标的一个新测数据,利用式(1)-(3)求出其相对劣化度 x ,根据式(10)产生一个随机数 En' ,然后根据式(11)求出其在正态云模型下对等级 g 的关联度 μ_g 。为满足开关柜整体评估中证据融合的要求,需将 μ_g 利用式(12)进行归一化处理。

$$\mu_g' = \frac{\mu_g}{\sum_{i=1}^4 \mu_i} \quad (12)$$

在求得所有指标对不同等级的关联度后,可依据上述最优权重理论求出各指标的组合权重 ω_i 。根据改进的模糊评估算法^[14],利用式(13)即可进行第 1 层评估,从而得出子系统和不同等级之间的关联度。

$$\mu_g = \sum_{i=1}^4 \omega_i \mu_g' \quad (13)$$

若有指标检测数据缺失或者无此项指标检测,

则将此项指标剔除,重新计算最优权重进行评估。

3.2 基于 D-S 证据理论的开关柜整体评估

作为一种不确定的推理方法,D-S 证据融合方法对避免主观权重对开关柜整体评估结果影响有良好的效果^[15],所以采用 D-S 证据融合方法对开关柜整体运行状态进行评估。

在证据理论中,定义一个样本空间 Θ ,它是由一系列两两相斥的命题 A_i 组成的辨识框架,即 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$,设 2^Θ 为所有样本子集构成的集合,称 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为基本概率分配函数,且满足下列条件

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (14)$$

当有 n 个相互独立的分配函数时,D-S 证据理论融合规则为

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{1-K} \sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_i) & A \neq \phi \\ 0 & A = \phi \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$; K 为规范系数,

$$K = \sum_{\cap A_i = \phi} \prod_{1 \leq j \leq n} m_j(A_i)$$

开关柜状态评估识别框架由 4 个评价等级构成,即: $\Theta = \{H_1, H_2, H_3, H_4\}$,设 $m(H)$ 为信度函数,即运行状态与各等级之间的关联度。

由于不同子系统对开关柜运行状态的重要性不同,将权重最大的子系统作为关键证据,对原始证据做以下处理

$$\begin{cases} \omega_{\max} = \max\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\} \\ \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_{\max}} \\ m_i'(H_g) = \bar{\omega}_i m_i(H_g) \\ m_i'(\Theta) = (1 - \bar{\omega}_i) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: ω_i 为第 i 个子系统的权重; n 为子系统的个数; $m_i(H_g)$ 为第 i 个子系统与评估等级 H_g 之间的信度函数值; $m_i'(H_g)$ 为处理后的信度函数值; $m_i'(\Theta)$ 为第 i 个子系统的不确定信度分配,即不确定度。

利用式(15)对子系统的评估结果进行融合,即可得到开关柜的整体运行状态评估结果。由于所提出的模型中评估等级只有 4 级,且各级有一定的交融性,对开关柜的评估结果采用最大关联度准则进行处理^[16]。

4 算例分析

选取 KYN28A-12 型号某开关柜在 2015 年 3 月

的一次检测数据对该开关柜的状态评估。其各项指标检测数据见表 4。

表 4 开关柜检测数据
Table 4 Data of switchgear

子系统	评价指标	测量值
绝缘状态 U_1	TEV 检测/(dB·mV ⁻¹)	22.00
	超声波检测	—
	母线绝缘电阻/MΩ	73.00
电气状态 U_2	合闸时间同周期性/ms	0.13
	分闸时间同周期性/ms	0.15
	合闸线圈电流/A	1.25
	触头接触电阻/μΩ	85.00
机械状态 U_3	平均分闸速度/(m·s ⁻¹)	1.48
	平均合闸速度/(m·s ⁻¹)	1.01
	合闸弹簧状态	—
历史记录 U_4	累计开断次数/次	839.00
	累计使用年数/a	13.00
	断路器累计电磨损	0.45

注:表中“—”表示无此项检测数据,下同。

根据该型号开关柜相关指标的限值,利用式(1)-(3)得到各子系统的相对劣化度向量分别为: $U_1=[0.564, -0.54]$; $U_2=[0.65, 0.75, 0.5, 0.85]$; $U_3=[0.73, 0.63, -]$; $U_4=[0.28, 0.65, 0.45]$ 。

根据正态云模型计算出各子系统与各等级直接的关联度矩阵为:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.042 & 5 & 0.956 & 1 & 0.001 & 4 \\ - & - & - & - & - & - & - & - \\ 0.000 & 0 & 0.123 & 8 & 0.875 & 4 & 0.000 & 7 \end{bmatrix}; \\
 R_2 &= \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.000 & 6 & 0.979 & 3 & 0.020 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.643 & 0 & 0.357 & 0 \\ 0.091 & 9 & 0.908 & 0 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.042 & 6 & 0.957 & 4 \end{bmatrix}; \\
 R_3 &= \begin{bmatrix} 0.000 & 0 & 0.000 & 0 & 0.781 & 8 & 0.218 & 1 \\ 0.000 & 0 & 0.001 & 7 & 0.987 & 4 & 0.010 & 9 \\ - & - & - & - & - & - & - & - \end{bmatrix}; \\
 R_4 &= \begin{bmatrix} 0.163 & 7 & 0.836 & 3 & 0.000 & 0 & 0.000 & 0 \\ 0.000 & 0 & 0.000 & 7 & 0.979 & 6 & 0.019 & 7 \\ 0.001 & 0 & 0.917 & 9 & 0.081 & 1 & 0.000 & 0 \end{bmatrix}。
 \end{aligned}$$

根据最优权重理论得出子系统中各指标的权重,然后依据第 2 节中式(13)得出各子系统与各评估等级之间的关联度矩阵见表 5。

根据最大关联度原则可以看出, U_1 、 U_2 、 U_3 子系统的运行状态为 H_3 , U_4 子系统的运行状态为 H_2 。

然后根据第 2 节中基于 D-S 证据理论的开关柜整体评估方法得出开关柜整体评价见表 6。

表 5 子系统与各评估等级之间的关联度

Table 5 Evaluation results of each subsystem

子证据	各评估等级关联度			
	H_1	H_2	H_3	H_4
U_1	0.000 0	0.081 0	0.917 9	0.001 1
U_2	0.000 0	0.101 9	0.556 5	0.341 6
U_3	0.000 0	0.000 9	0.888 4	0.110 7
U_4	0.050 1	0.591 4	0.351 8	0.006 7

表 6 开关柜整体评估结果

Table 6 Overall assessment of switchgear

$m_i(\Theta)$	各评估等级关联度			
	H_1	H_2	H_3	H_4
0.000 00	0.000 00	0.033 97	0.966 00	2.783 00×10 ⁻⁶

依据最大关联度原则可以看出开关柜整体运行状态评估等级为 H_3 , 即开关柜存在事故隐患, 还可以短期带故障运行, 应适时安排停电检修。经过检修发现开关柜存在断路器操作机构卡滞, 母线绝缘老化等情况。经过及时的维修, 避免了开关柜故障的进一步发展, 保证了电力系统的运行安全。

5 结语

依据开关柜的状态信息类型不同, 对各种指标进行聚类, 将开关柜的状态评估分成 2 个层次, 运用最优权重方法对各指标的合理赋权, 利用正态云模型和证据理论对开关柜运行状态进行定量评估。

经过实例验证, 所提出的研究方法有以下优点: ①利用正态云模型考虑了不确定性的模糊性和随机性, 克服了之前评价模型忽视随机性的缺点; ②该模型结构清晰并且评价指标易于得到, 而且不需要大量的历史数据, 能准确地对开关柜运行状态进行定量评价。

但是也有一些不足之处, 如在选取评价指标时只选取了开关柜本体器件, 而没有涵盖开关柜附件(如避雷器等)的运行状态, 下一步的工作将对此进行完善和改进。

参考文献:

- [1] 贺建新. 高压开关柜状态检修的研究[J]. 科技广场, 2011 (11): 166-168.
HE Jianxin. Research on condition-based maintenance of high voltage switchgear[J]. Technology Square, 2011 (11): 166-168.
- [2] 天璇志, 贺景亮. 电气设备的绝缘在线监测与状态维修[J]. 中国电力, 2000, 33(3): 46-50.
TIAN Dianzhi, HE Jingliang. Online monitoring of insulation and condition-based maintenance of the electrical

- equipment[J]. Electric Power of China, 2000, 33(3): 46-50.
- [3] 王震宇, 黄海波, 张 兵. 基于故障树理论的高压开关柜状态检修[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(4): 21-25.
WANG Zhenyu, HUANG Haibo, ZHANG Bing. Status overhaul of high voltage switchgear based on fault tree theory[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(4): 21-25.
- [4] 谢 静, 束洪春, 王 科. 基于模糊分层理论的高压开关柜状态评估算法[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3196-3192.
XIE Jing, SHU Hongchun, WANG Ke. State evaluation based on AHP fuzzy theory of high voltage switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3196-3192.
- [5] 蒋建兵. 云理论及其应用研究[D]. 广西: 广西大学, 2008.
JIANG Jianbing. Cloud theory and its application[D]. Guangxi: Guangxi University, 2008.
- [6] 国家电网公司. Q/GDW 613—2011 12~40.5 kV 交流金属封闭开关设备状态检修导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
State Grid Corporation of China. Q/GDW 613—2011 Guide for condition based maintenance strategy of alternating-current metal-enclosed switchgear for rated voltages between 12 kV and 40.5 kV[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [7] 郑 娜. 电力变压器状态评估和故障诊断的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
ZHENG Na. Study on condition assessment and fault diagnosis of power transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
- [8] 金 健. 基于归一化的工程评标模型[J]. 常熟理工学院学报, 2008(4): 39-43.
JIN Jian. Engineering judgment model based on normalized method[J]. Journal of Changshu Institute of Technology, 2008(4): 39-43.
- [9] 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.
- [10] 陈开明. 非线性规划[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1991.
CHEN Kaiming. Nonlinear programming[M]. Shanghai: Fudan University Publishing House, 1991.
- [11] 迟国泰, 齐 菲. 基于最优组合赋权的城市生态评价模型及应用[J]. 运筹与管理, 2012, 21(2): 183-191.
CHI Guotai, QI Fei. The city's ecosystem evaluation model based on optimal combination weights and its application[J]. Operations Research and Management Science, 2012, 21(2): 183-191.
- [12] 毛定祥. 一种最小二乘意义下主客观评价一致的组合评价方法[J]. 中国管理科学, 2002, 10(5): 95-97.
MAO Dingxiang. A combinational evaluation method resulting in consistency between subjective and objective evaluation in the least squares sense[J]. Chinese Journal of Management Science, 2002, 10(5): 95-97.
- [13] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud mode[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.
- [14] 熊德国. 模糊综合评价方法的改进[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(6): 93-96.
XIONG Deguo. Improvement of fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2003, 26(6): 93-96.
- [15] 徐余法, 王 健. 改进 D-S 证据理论在发电机故障诊断中的应用[R]. 厦门: 中国自动化学会, 2012.
XU Yufa, WANG Jian. Application of improved D-S evidence theory in generator fault diagnosis[R]. Xiamen: China Automation Society, 2012.
- [16] 姚 敏. 最大关联隶属原则及其应用[J]. 控制与决策, 1991, 6(4): 283-288.
YAO Min. The principle of biggest association membership and its application[J]. Control and Decision, 1991, 6(4): 283-288.
- 贾亚楠(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网开关设备方面研究。
- 隋慧斌(1974—), 女, 副教授, 主要从事电力系统分析, 智能配电网方面研究。