

基于关联规则和变权重系数的 SF₆ 高压断路器 状态综合评估

黄绪勇¹, 孙鹏¹, 耿苏杰², 王秀丽²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

2. 南京理工大学经济管理学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 鉴于目前高压断路器状态评估方法依靠人们主观经验确定指标权重的情况, 提出一种基于实例样本统计规律的 SF₆ 高压断路器状态综合评估方法。根据试验和实时监测状态指标与断路器不同劣化特性的关联关系, 构建层次性评估指标体系。通过分析不同状态指标量化特征, 提出评分值计算函数; 同时, 基于关联规则置信度计算指标项的权重系数, 以客观地量化它们的相对重要性。采用变权重方法并实验性地选取均衡参数来计算综合指标的权重系数, 旨在解决综合状态相对劣化程度不均衡问题。实例计算表明, 所提出的方法能够较客观有效地评估 SF₆ 高压断路器综合状态, 为断路器安全管控和状态维护提供参考依据。

关键词: 高压断路器; 状态评估; 关联规则; 变权重

An assessment method of SF₆ high-voltage circuit breaker based on association rules and variable weight coefficients

HUANG Xuyong¹, SUN Peng¹, GENG Sujie², WANG Xiuli²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Company Limited, Kunming 650217, China;

2. School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Considering that the existing assessment methods depend on expert's experience and knowledge excessively, this paper presents an assessment method of SF₆ high-voltage circuit breakers based on statistical regularity of samples of breakers. After identifying relations between the experimental and monitoring items and the deterioration properties of breakers, the assessment index system is constructed. The score functions of status items are proposed by analyzing their characteristics. Meanwhile, the weights of status items are calculated by using confidence coefficients of association rules to scale their relative importance quantitatively and objectively. The variable-weight formula is adopted and the equilibrium parameters are selected experimentally to calculate weight coefficients of comprehensive indices, thus to settle the imbalance of comprehensive state relative deterioration degree. The instances illustrate that the proposed method is able to evaluate the comprehensive state of SF₆ high-voltage circuit breakers effectively, which provides a new method for safety control and condition maintenance of circuit breakers.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 71571101).

Key words: high-voltage circuit breaker; conditional assessment; association rule; variable weight

0 引言

高压断路器是电网系统最重要的开关设备, 其运行状态好坏直接关系着整个电力系统的安全与稳定。对高压断路器的健康状态进行综合评估, 是确定其安全管控等级及实行设备状态维修的前提工作。

目前, 断路器状态综合评估研究集中在提出各种模糊综合评价方法^[1-5]。文献[1-2]分别构造不同的征兆状态指标隶属度函数, 然后由专家主观经验, 通过两两比较来确定指标权重。为了强调严重劣化综合状态量反映断路器整体性能的重要性, 文献[3]引入均衡函数对上层各综合指标权重进行修正。文献[4]采用灰色理论对主观确定的指标权重进行处理, 提出了断路器灰色模糊综合评价模型。文献[5]通过三

角模糊数对指标主观权重进行处理, 提出基于正态云的断路器灰色模糊综合评价模型。目前已应用该方法评估电力系统的健康状态^[6-7]。模糊综合评价方法通过隶属度函数刻画了征兆状态反映断路器整体状态的模糊性和不确定性, 但需要依靠专家经验给征兆状态指标恰当地分配权重。依赖专家主观经验的局限性, 不便于方法的推广应用。

近几年来, 国内外学者考虑到故障征兆状态量之间及其反映电力变压器不同故障类型的关联关系, 采用关联规则方法来评估电力变压器综合状态, 获得了良好的评估效果^[8-10]。这些方法根据实例样本统计规律而不是由专家主观比较打分来计算征兆状态指标权重。事实上, 高压断路器的故障征兆状态指标与故障类型之间同样存在概率关联关系^[11-12]。目前, 越来越多的实际电网企业建立了电力生产集成信息平台, 并不断积累断路器试验和监测数据及故障记录信息, 如何利用设备信息样本中的关联统计规律来评估高压断路器综合状态值得研究。

鉴于以上分析, 本文提出基于关联规则与变权重的 SF₆ 高压断路器状态综合评估方法。具体的, 在构建层次性评估指标体系基础上, 通过分析不同征兆状态指标量化特征, 提出评分值计算函数; 同时运用关联规则方法, 由运行环境相近的同类型断路器实例样本来计算底层指标项权重系数。根据因素空间理论引入变权重公式^[13], 并辅以实验分析选择公式均衡参数, 由此计算各综合性能指标的权重系数。最后通过实例验证该评估方法的有效性。

1 评估指标体系的构建

SF₆ 高压断路器状态评估采用两层评估指标体系, 上层由设备机械、绝缘和电气性能综合状态指标组成; 底层由分别与各上层指标关联的试验与实时监测征兆状态指标项构成。为了构建评估指标体系, 首先分析电网企业通常信息系统平台所记录的高压断路器数据信息情况。

企业信息系统平台所记录的 SF₆ 高压断路器信息繁多, 一般包括静态、(准)动态检视和外界环境三种类型^[14]。静态数据包括断路器台帐和投运前试验参数值等, 可作为状态项参量初始值和严重阈值(注意值)等。(准)动态检视数据包括定时更新的例行预防性试验、带电检测、在线监测和缺陷/故障检修记录, 能及时地反映设备健康状态及风险。外界环境数据包括温度、湿度、雷电、山火、大风等因素。考虑所需实例样本及待评估设备指标项数据的规范性、可测度性和完备性, 选择征兆状态指标项要注

意以下几点: ① 所有状态指标项要涵盖断路器机械、绝缘和电气特性; ② 状态指标项应该能够量化地反映断路器运行状态及劣化趋势, 据此不使用外界环境数据; ③ 状态指标项数据应该齐全, 如无出厂试验值, 指标项不宜选为状态指标; ④ 状态指标项量值变化范围应能够映射断路器机械、绝缘或电气所有劣化状态, 如长时工频耐压试验只有合格与否两种情况, 不宜选为状态指标项。

基于以上选择考虑, 根据企业安全生产管理实践和借鉴已有研究成果^[2,4,15-17], 构建 SF₆ 高压断路器状态指标评价体系如表 1 所示。

表 1 SF₆ 高压断路器状态评估指标体系

Table 1 Assessment index system of SF₆

high-voltage circuit breakers

综合指标	状态指标项	综合指标	状态指标项
机械性能	I_1 : 刚分速度	绝缘性能	I'_1 : SF ₆ 气体密度
	I_2 : 刚合速度		I'_2 : SF ₆ 气体压力
	I_3 : 分闸时间		I'_3 : 微水含量
	I_4 : 合闸时间		I'_4 : 局部放电量
	I_5 : 合闸不同期	电气性能	I''_1 : 主回路电阻值
	I_6 : 分闸不同期		I''_2 : 相对电磨损程度
	I_7 : 分闸线圈电流值		
	I_8 : 合闸线圈电流值		
	I_9 : 总行程		
	I_{10} : 分闸振动峰值		
	I_{11} : 合闸振动峰值		
	I_{12} : 储能电机打压时间		

底层指标量值需要归一化为百分制的评分值。单项评分值越低意味着断路器在该项表现的劣化程度越严重。令 x_i 、 x'_j 和 x''_k 分别表示指标项 I_i 、 I'_j 和 I''_k 的量值, 这里 $i=1,2,\dots,12$, $j=1,2,3,4$ 和 $k=1,2$ 。征兆状态指标项评分函数可以描述为以下几种类型。

1) 对称折线函数: 一些状态指标项量值正常范围为 $[a-\delta, a+\delta]$, 过大或过小都意味着断路器状态具有劣化倾向。令参数 a_1 和 a_2 ($a_1 < a_2$) 分别表示该指标严重状态的下限和上限阈值; 由维护人员根据该断路器安全生产规程给定。该状态指标评分值 $v(x_i)$ 定义为

$$v(x_i) = \begin{cases} 80 + 20 \cdot (x_i - (a - \delta)) / \delta & \text{if } a - \delta < x_i \leq a \\ 80 + 20 \cdot ((a + \delta) - x_i) / \delta & \text{if } a < x_i \leq a + \delta \\ 80 \cdot (x_i - a_1) / ((a - \delta) - a_1) & \text{if } a_1 \leq x_i \leq a - \delta \\ 80 \cdot (a_2 - x_i) / (a_2 - (a + \delta)) & \text{if } a + \delta < x_i \leq a_2 \\ 0 & \text{if } x_i < a_1 \text{ or } x_i > a_2 \end{cases} \quad (1)$$

该函数把状态项正常值范围映射为 80~100 分, 其他量值映射为 0~80 分。该函数类型的指标项为 $\{I_1, I_2, I_3, I_4, I_7, I_8, I_9\}$ 。

2) 折线降函数: 一些状态指标项量值正常范围为 $[a, a + \delta]$, 过大意味着断路器状态具有劣化倾向。令参数 a_2 表示该指标严重状态上限阈值; 由维护人员根据该断路器安全生产规程给定。该状态指标评分值 $v(x_i)$ (或 $v(x'_i)$ 、 $v(x''_i)$) 定义为

$$v(x_i) = \begin{cases} 80 + 20 \cdot ((a + \delta) - x_i) / \delta & \text{if } a \leq x_i \leq a + \delta \\ 80 \cdot (a_2 - x_i) / (a_2 - (a + \delta)) & \text{if } a + \delta < x_i \leq a_2 \\ 0 & \text{if } x_i > a_2 \end{cases} \quad (2)$$

该函数类型的指标项为 $\{I_5, I_6, I_{10}, I_{11}, I_{12}, I'_3, I'_4, I''_1\}$ 。

3) 折线升函数: 一些状态指标项量值正常范围为 $[a - \delta, a]$, 过小意味着断路器状态具有劣化倾向。令参数 a_1 表示该指标严重状态下限阈值; 由维护人员根据该断路器安全生产规程给定。该状态指标评分值 $v(x'_i)$ 定义为

$$v(x'_i) = \begin{cases} 80 + 20 \cdot (x'_i - (a - \delta)) / \delta & \text{if } a - \delta \leq x'_i \leq a \\ 80 \cdot (x'_i - a_1) / ((a - \delta) - a_1) & \text{if } a_1 < x'_i \leq a - \delta \\ 0 & \text{if } x'_i \leq a_1 \end{cases} \quad (3)$$

该函数类型的指标项为 $\{I'_1, I'_2\}$ 。

4) 线性降函数: 令断路器电磨损寿命初始值为 a ($0 < a \leq 1$); 令 x''_2 为断路器出厂或最近大修之后的累计相对电磨损。该状态指标 I''_2 的评分值 $v(x''_2)$ 定义为

$$v(x''_2) = \begin{cases} 100(a - x''_2) & \text{if } 0 \leq x''_2 \leq a \\ 0 & \text{if } x''_2 > a \end{cases} \quad (4)$$

这里, 根据断路器出厂提供的 $I-N$ 曲线, 由每次开断电流可找出所对应的最大允许开断次数 N , 则 $1/N$ 为本次开断的相对磨损量。

2 评估指标权重系数计算

本文采用关联规则方法计算拟评估断路器底层状态指标的权重系数。考虑到任何机械、绝缘或电气性能严重劣化都意味着断路器整体健康状态的严重下降, 采用变权重方法来计算综合状态指标权重系数。

2.1 关联规则方法

关联规则是数据挖掘领域知识发现的重要手段, 描述了事务数据库中不同项之间的相关性。记事务数据库为 Ψ , $|\Psi|$ 为事务数据库事务数; 假设项集 U 和 V 满足 $U \subset \Psi$, $V \subset \Psi$, 且 $U \cap V$ 为空集,

则称形如 $U \Rightarrow V$ 的式子为关联规则, U 和 V 分别称为该关联规则的前件和后件(或前提和结论)。一般用支持度和置信度来分别刻画关联规则方法的有效性和可信性。

令 $f(U)$ 和 $f(U \cup V)$ 分别表示 U 和 $U \cup V$ 在事务数据库 Ψ 中出现的频数。支持度是指项集 $U \cup V$ 在事务数据库中所占的比例, 即

$$\text{sup}(U \Rightarrow V) = P(U \cup V) = \frac{f(U \cup V)}{|\Psi|} \times 100\% \quad (5)$$

表征了关联规则 $U \Rightarrow V$ 的关联程度。支持度越大, 前件 U 和后件 V 之间的关联程度越高。

置信度用来表征关联规则 $U \Rightarrow V$ 的可信程度; 置信度越高, 表示该关联规则的可信程度越高。该指标值由条件概率 $P(V|U)$ 得到, 表示事务数据库 Ψ 中包含 U 情况下同时包含 V 所占的比例, 即

$$\text{conf}(U \Rightarrow V) = P(V|U) = \frac{f(U \cup V)}{f(U)} \times 100\% \quad (6)$$

SF₆ 断路器出现故障意味着至少有 1 项综合性指标发生故障。综合性指标发生故障意味着至少有 1 项所对应的底层状态指标超标, 反之则不然。分别定义关联规则 $X_i \Rightarrow Y$, $X'_j \Rightarrow Y'$ 和 $X''_k \Rightarrow Y''$ 的前件和后件如下:

- 前件 $X_i = \{\text{指标项 } I_i \text{ 的量值 } x_i \text{ 超标}\}$;
- 后件 $Y = \{\text{机械性能综合指标故障发生}\}$;
- 前件 $X'_j = \{\text{指标项 } I'_j \text{ 的量值 } x'_j \text{ 超标}\}$;
- 后件 $Y' = \{\text{绝缘性能综合指标故障发生}\}$;
- 前件 $X''_k = \{\text{指标项 } I''_k \text{ 的量值 } x''_k \text{ 超标}\}$;
- 后件 $Y'' = \{\text{电气性能综合指标故障发生}\}$ 。

这里 $i=1, 2, \dots, 12$, $j=1, 2, 3, 4$, $k=1, 2$ 。底层指标超标是指该量值超过上限或低于下限注意值。

为了对 SF₆ 断路器状态进行评估, 首先从企业信息系统中分别抽取运行环境相近的同类型 SF₆ 断路器样本生成机械、绝缘和电气性能三个综合指标事务数据库, 分别被记为 Λ 、 Λ' 和 Λ'' 。其中, Λ 中每个样本必须至少包含 $Y, X_1, X_2, \dots, X_{12}$ 中的 1 个项集; Λ' 和 Λ'' 需要满足同样的要求。然后, 设定支持度最小阈值, 由式(5)来检验关联规则是否为频繁项集。对频繁项集的关联规则, 计算其置信度。由式(6), 关联规则 $X_i \Rightarrow Y$ 置信度 θ_i 可计算如式(7)。

$$\theta_i = \text{conf}(X_i \Rightarrow Y) = P(Y|X_i) = \frac{f(X_i \cup Y)}{f(X_i)} \times 100\% \quad (7)$$

相似的, 使用 Λ' 和 Λ'' , 可计算出关联规则 $X'_j \Rightarrow Y'$ 和 $X''_k \Rightarrow Y''$ 的置信度 θ'_j 和 θ''_k 。

2.2 底层指标权重计算

经分析不难发现,在反映上层性能综合指标上, SF₆ 断路器底层状态指标之间有的相互关联,有的相互独立。仅通过两两比较来主观确定它们的权重系数,难免权重分配错误。上述关联规则方法可以借助于大量断路器样本所蕴含的统计规律,根据所计算的故障征兆状态反映综合性能指标的置信度大小来分配其权重。这样既可以包容底层指标之间不同性质的关系,也能有效避免主观经验失误对评价结果的影响。

对于机械性能综合状态对应的单项指标 I_i , 令 τ_i 表示其权重系数。根据所计算的单项状态与综合状态的关联置信度 θ_i , 定义 I_i 的权重系数 τ_i 为 $\tau_i = \theta_i / (\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_{12})$ 。该定义实际上是把各单项指标置信度进行了归一化处理。

同样,对于绝缘和电气性能综合状态对应的单项指标 I'_j 和 I''_k , 令 τ'_j 和 τ''_k 分别表示其权重系数。进行归一化处理,可定义它们的权重系数分别为 $\tau'_j = \theta'_j / (\theta'_1 + \theta'_2 + \theta'_3 + \theta'_4)$ 和 $\tau''_k = \theta''_k / (\theta''_1 + \theta''_2)$ 。

由定义可知,如果哪个底层指标超标导致相应的综合指标处于严重状态可能性大,则该底层指标在计算综合状态评分值时的权重就越大;否则,该底层指标的权重就小。

2.3 综合指标变权重计算

综合状态指标反映了断路器机械、绝缘和电气三个不同方面的劣化情况,具有相对独立性。实际企业在评价断路器状态时常采用常权重来计算总分。当各综合指标劣化相对均衡时,该方法具有合理性。实际上,由于机构部件质量、维护情况及运行环境等内外因素的影响,三方面劣化程度往往会呈现不均衡。当某一方面性能严重劣化时,如果采用常权重系数,则可能推断出断路器整体状态仍处于正常状态。因此,需要通过变权重方法来反映 SF₆ 高压断路器真实运行状态。

因素空间理论为在综合评价中处理各要素均衡性提供了理论方法依据^[13]。就 SF₆ 高压断路器机械、绝缘和电气劣化综合指标,引入如下变权重公式。

令 u_1 、 u_2 和 u_3 分别表示断路器机械、绝缘和电气性能综合指标评分值,即

$$\begin{cases} u_1 = \sum_{i=1}^{12} \tau_i v(x_i) \\ u_2 = \sum_{j=1}^4 \tau'_j v(x'_j) \\ u_3 = \sum_{k=1}^2 \tau''_k v(x''_k) \end{cases} \quad (8)$$

令 w_1 、 w_2 和 w_3 分别表示断路器机械、绝缘和电气综合指标常权重系数,则它们的变权重系数 \bar{w}_1 、 \bar{w}_2 和 \bar{w}_3 可分别计算如下。

$$\bar{w}_i = w_i u_i^{\alpha-1} / \sum_{j=1}^3 w_j u_j^{\alpha-1}, \quad i=1, 2, 3 \quad (9)$$

通常情况下,常权重系数取 $w_i = 1/3$ 。式(9)中, α 为均衡参数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。参数 α 取值越小,表示该评价方法越强调严重劣化综合状态对断路器健康状态评分值的影响。 α 选取很重要,下文利用断路器实例样本,通过计算和实验比较来选择合适的 α 取值。

3 状态评估步骤

SF₆ 高压断路器状态管控分成五个等级,具体描述如表 2 所示。它是根据电力行业有关规定和标准,结合本企业实际安全生产情况制定的。如果断路器处于“异常”或“严重”状态,则设备发生故障可能性很大或已发生故障,需要及时采取维护措施。如果断路器处于“注意”或“轻微”状态,可对设备暂不采取处理措施,但需跟踪关注。

表 2 SF₆ 高压断路器状态与评分值

Table 2 Status and scores of SF₆ high-voltage circuit breakers

断路器状态	评分值范围	基本描述
正常	81~100	机械、绝缘和电气性能所涵盖的底层试验与监测状态指标均处于正常范围。 有的底层状态指标可能略超出正常范围,但不影响人身、电网和运行安全,只需跟踪关注可暂不采取处理措施。
注意	61~80	有的底层状态指标超出正常范围,但基本不影响人身、电网和运行安全,只需跟踪关注可暂不采取处理措施。
轻微	41~60	一些底层状态指标超出正常范围,可能对人身、电网和设备安全及经济运行造成重大影响;尽管在短时间内还能坚持运行,但需尽快进行处理。
异常	21~40	一些底层状态指标严重超出正常范围,随时可能对人身、电网和设备安全及经济运行造成严重影响,需立即进行处理。
严重	0~20	

根据所构建的评估指标体系,利用所提出的状态指标及其权重计算方法,可对 SF₆ 高压断路器运行状态进行综合评估。具体实现步骤如下。

步骤 1 从企业信息平台导出运行环境相近的同类型 SF₆ 高压断路器故障样本数据库 Γ , 每个样本包括断路器及其综合状态记录信息,以及如表 1 所列的底层状态指标项数据。从 Γ 中分别抽出机

械、绝缘和电气综合状态指标数据库 Λ 、 Λ' 和 Λ'' 。

步骤 2 分别使用 Λ 、 Λ' 和 Λ'' ，由式(5)检验状态指标项 I_i 、 I'_j 和 I''_k 应满足最小支持度阈值；如果满足，则由式(7)计算 I_i 、 I'_j 和 I''_k 的置信度 θ_i 、 θ'_j 和 θ''_k ；进一步，计算每个底层指标项的权重 τ_i 、 τ'_j 和 τ''_k 。

步骤 3 确定参数 α 。对不同取值 $\alpha = 0, 0.2, \dots, 1.0$ ，使用 Γ 中样本分别计算相应的判断准确率；选择准确率最高的 α 值作为均衡参数。

步骤 4 就拟评估断路器，由式(1)、式(2)、式(3)或式(4)计算每个底层状态指标项的评分值 $v(x_i)$ 、 $v(x'_i)$ 和 $v(x''_i)$ 。令 $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$ ，由式(8)和式(9)分别计算综合状态评分值 u_1 、 u_2 和 u_3 ，以及变权重系数 \bar{w}_1 、 \bar{w}_2 和 \bar{w}_3 。

步骤 5 计算断路器整体健康状态评分值 $F = \bar{w}_1 u_1 + \bar{w}_2 u_2 + \bar{w}_3 u_3$ ，根据表 2 确定其状态管控等级；可由综合及底层状态指标项评分值情况来判断断路器故障部位范围及严重程度。

4 实例分析

从西南某省电网企业信息系统平台收集整理了相近运行环境下的 500 kV 等级 SF₆ 高压断路器的 568 组样本。其中，428 组故障样本作为内样本，用来计算底层状态指标权重和确定均衡参数；另外的 140 组外样本用来检验评估方法的有效性。

4.1 指标权重计算及均衡参数确定

故障样本中至少有 1 项综合状态发生故障，或多项综合状态发生并发故障；同时所对应的一些底层指标量值已超标。针对每一个底层状态指标，事务数据库由包含 {该量值超标, 综合指标故障发生}，{该量值超标, 综合指标故障未发生} 和 {该量值未超标, 综合指标故障发生} 的所有实例样本组成。考虑到 SF₆ 高压断路器实际故障中，机械、绝缘和电气特性并发故障占比较小，本文设置最小支持度阈值为 45%。关联规则方法所计算的底层状态指标支持度、置信度和权重系数如表 3 所示。

由表 3 可知，所选取的单项指标与综合指标的关联规则支持度较高，均大于所设置的最小支持度阈值 45%。这说明所构建的断路器评估指标体系是比较合理的。

考虑到均衡参数不同取值对正常样本评分值变化影响不大，仅使用故障本来计算选取其合适的取值。具体的，分别在 $\alpha = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0 的情况下，计算 428 组故障样本的评分值。针对

不同取值，所计算的故障样本评分值中，不超过 40 分的样本个数占总样本的百分比称为参数 α 选取的评估准确率。计算结果如图 1 所示。比较结果显示，当 $\alpha = 0$ 时，本评估方法对应的评估准确率最高。因此，下文中 α 取为 0。

表 3 底层状态项的支持度、置信度及权重系数

Table 3 Support degree, confidence and weight coefficients of status items

综合状态	单项量	样本数	单项超标总数	故障例单项超标数	支持度	置信度	权重系数
机械性能	I_1	155	121	109	0.7032	0.9008	0.0998
	I_2	154	119	108	0.7013	0.9076	0.1005
	I_3	155	120	108	0.6968	0.9000	0.0997
	I_4	156	122	109	0.6987	0.8934	0.0990
	I_5	143	101	101	0.7063	1.0	0.1108
	I_6	143	103	103	0.7203	1.0	0.1108
	I_7	199	156	100	0.5025	0.6410	0.0710
	I_8	200	156	99	0.4950	0.6346	0.0703
	I_9	201	158	100	0.4975	0.6329	0.0700
	I_{10}	274	262	131	0.4781	0.5000	0.0553
	I_{11}	275	262	130	0.4727	0.4962	0.0550
	I_{12}	265	255	133	0.5019	0.5216	0.0578
绝缘性能	I'_1	209	178	112	0.5358	0.6292	0.2218
	I'_2	179	151	115	0.6425	0.7616	0.2685
	I'_3	155	113	101	0.6516	0.8938	0.3152
	I'_4	243	203	112	0.4786	0.5517	0.1945
电气性能	I''_1	213	186	115	0.5399	0.6183	0.4087
	I''_2	156	133	119	0.7628	0.8947	0.5913

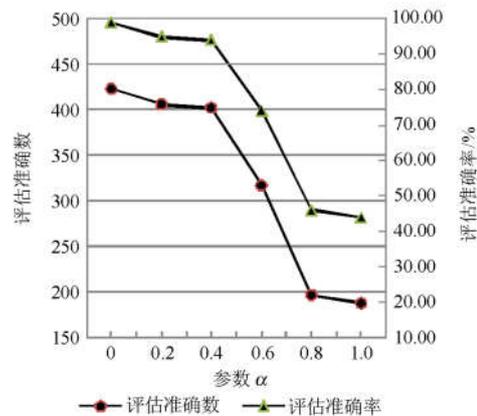


图 1 均衡参数 α 不同取值下的评估准确率

Fig. 1 Accuracy rate of assessment with equilibrium parameter α

4.2 计算实例分析

以一台 500 kV 的 SF₆ 高压断路器为例，来说明本评估方法的计算过程。通过整理，2016 年 1 月份的该断路器试验与实时监测项及静态数据如表 4 所示。

在 4.1 节, 已实施步骤 1 至步骤 3, 由关联规则方法计算了各底层指标权重系数, 并实验计算选取了均衡参数。就拟评估断路器, 执行步骤 4, 所计算的底层指标评分值如表 5 所示; 所计算的综合状态评分及变权重如表 6 所示。执行步骤 5, 可计算出该 SF₆ 高压断路器该时点的综合评分值 F 为 35.8。

表 4 实例底层状态项数据

Table 4 Data of status items of the instance

单项状态量	实测值	正常值范围	注意值	
			上限	下限
I_1 : 刚分速度	1.8	2.6 ± 0.2	3.4	1.8
I_2 : 刚合速度	1.9	2.6 ± 0.2	3.4	1.8
I_3 : 分闸时间	25	17 ± 3	25	12
I_4 : 合闸时间	88	75 ± 10	90	55
I_5 : 合闸不同期	2.7	[0,0+3]	5.0	—
I_6 : 分闸不同期	1.5	[0,0+2]	3.0	—
I_7 : 分闸线圈电流值	2.1	2 ± 0.4	3.0	1.2
I_8 : 合闸线圈电流值	2.1	2 ± 0.4	3.0	1.2
I_9 : 总行程	247	228 ± 3	256	200
I_{10} : 分闸振动峰值	80	[50,50+10]	100	—
I_{11} : 合闸振动峰值	92	[50,50+10]	100	—
I_{12} : 储能电机打压时间	221	[180,180+20]	250	—
I'_1 : SF ₆ 气体密度	0.53	[0.6-0.05,0.6]	—	0.4
I'_2 : SF ₆ 气体压力	0.52	[0.6-0.1,0.6]	—	0.4
I'_3 : 微水含量(10^{-6})	216	[0,0+200]	300	—
I'_4 : 局部放电量	1.2	[0,0+1]	2.0	—
I''_1 : 主回路电阻值	87.5	[40,40+20]	75	—
I''_2 : 相对电磨损程度	0.84	—	—	—

表 5 实例底层状态项评分值

Table 5 Scores of status items of the instance

单项状态量	评分值	单项状态量	评分值
I_1	32.7	I_{10}	57.1
I_2	40.6	I_{11}	43.4
I_3	48.0	I_{12}	66.6
I_4	72.5	I'_1	73.4
I_5	82.0	I'_2	85.6
I_6	85.0	I'_3	73.3
I_7	95.0	I'_4	70.0
I_8	95.0	I''_1	21.4
I_9	67.4	I''_2	16.0

表 6 实例综合指标评分值及其变权重

Table 6 Scores and variable weights of comprehensive indices of the instance

综合指标	评分值	变权重系数
机械性能	63.5	0.1877
绝缘性能	76.0	0.1569
电气性能	18.2	0.6554

比照表 2 可知, 该 SF₆ 高压断路器处于“异常”状态。在表 6 中, 电气性能综合指标的评分值为 18.2, 在所有综合指标中评分最低, 由此推断断路器可能存在电气性能故障。经过维护人员检查发现, 动静触头表面已严重烧蚀, 造成其接触电阻变大, 更换新的动静触头后, 断路器恢复正常。

4.3 评估方法有效性分析

为验证所述评估方法的有效性, 使用 140 组样本进行了计算实验。其中 100 组为故障样本, 40 组为正常样本。所计算的样本评分值分布如表 7 所示。

表 7 外样本评分值计算分布结果

Table 7 Scores distribution of external samples

	样本数	严重	异常	轻微	注意	正常
		0~20	21~40	41~60	61~80	81~100
正常样本	40	0	0	0	2	38
故障样本	100	68	29	3	0	0

由表 7 可知, 对于 40 组正常样本, 评估结果是 38 组为正常状态; 2 组为注意状态(计算评分略低于 80 分)。对于 100 组故障样本, 评估结果是大部分情况为严重状态, 少部分为异常状态; 只有极个别的 3 组为轻微状态(计算评分略高于 40 分), 偏异常。据此, 可以说评估结果与实际情况基本相符。这表明该评估方法能够较准确地反映 SF₆ 高压断路器真实的运行状态。

5 结论

本文提出了基于实例样本统计规律的 SF₆ 高压断路器状态综合评估方法。该方法有效避免了目前底层状态指标权重确定依赖专家经验的主观性问题; 通过引入变权重公式解决了综合状态性能劣化不均衡所致的评价结果失真问题。实例计算表明, 该评估方法能够较客观有效地评估 SF₆ 高压断路器的综合状态。

参考文献

- [1] 陈伟根, 李伟, 陈新岗, 等. SF₆ 高压断路器状态分析的模糊综合评判方法[J]. 高压电器, 2004, 40(5): 361-363.
CHEN Weigen, LI Wei, CHEN Xingang, et al. The fuzzy comprehensive evaluation method for condition analysis of SF₆ high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(5): 361-363.
- [2] 陈朋永, 宋晓磊, 陈云飞, 等. SF₆ 高压断路器运行状态模糊综合评估[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 171-176.
CHEN Pengyong, SONG Xiaofei, CHEN Yunfei, et al. Fuzzy comprehensive evaluation on the operation conditions of SF₆ high voltage circuit breaker[J]. High Voltage

- Apparatus, 2016, 52(3): 171-176.
- [3] 陈伟根, 魏延芹, 廖瑞金. 高压断路器运行状态的变权模糊综合评判方法[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 73-77. CHEN Weigen, WEI Yanqin, LIAO Ruijin. Variable weight fuzzy comprehensive evaluation method for operation condition of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 73-77.
- [4] 国连玉, 李可军, 梁永亮, 等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 161-167. GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 161-167.
- [5] 江洁, 苟怀强, 唐道龙, 等. 一种基于三角模糊数理论的断路器状态评估改进方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 32-36. JIANG Jie, GOU Huaiqiang, TANG Daolong, et al. An improved method for condition assessment of circuit breaker based on triangular fuzzy number theory[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 32-36.
- [6] 胡佳琳, 张炜, 操丹丹, 等. 基于模糊理论的电力系统健康状况的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 61-66. HU Jialin, ZHANG Wei, CAO Dandan, et al. Research on health status of power system based on fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 61-66.
- [7] 黄知超, 谢霞, 王斌. 结合模糊综合评判与决策的电力系统状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 65-69. HUANG Zhichao, XIE Xia, WANG Bin. Power system state estimation combined with fuzzy comprehensive evaluation and decision-making[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-69.
- [8] LEE L, XIE L J, DENG Z, et al. Condition assessment of power transformers using a synthetic analysis method based on association rule and variable weight coefficients[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2052-2060.
- [9] LEE L, CHENG Y, XIE L J, et al. An integrated method of set pair analysis and association rule for fault diagnosis of power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2368-2378.
- [10] 谢龙君, 李黎, 程勇, 等. 融合集对分析和关联规则的变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 277-286. XIE Longjun, LI Li, CHENG Yong, et al. A fault diagnosis method of power transformers by integrated set pair analysis and association rules[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 277-286.
- [11] 荣亚君, 葛葆华, 赵杰, 等. 用粗糙集理论和贝叶斯网络诊断 SF₆ 断路器故障[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2995-2999. RONG Yajun, GE Baohua, ZHAO Jie, et al. Fault diagnosis of SF₆ circuit breaker using rough set theory and Bayesian network[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2995-2999.
- [12] 杨凌霄, 朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 62-67. YANG Lingxiao, ZHU Yali. High voltage circuit breaker fault diagnosis of probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 62-67.
- [13] 汪陪庄, 李洪兴. 知识表示的数学理论[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1994.
- [14] 谢善益, 杨强, 梁成辉, 等. 输变电设备远程诊断信息平台中的统一状态监测模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 86-91. XIE Shanyi, YANG Qiang, LIANG Chenghui, et al. Research of unified condition monitoring information model in data platform of power transmission equipment remote monitoring and diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 86-91.
- [15] 黄凌洁, 王玮, 吴振升, 等. 基于模糊理论的高压 SF₆ 断路器故障诊断模型的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 246-249. HUANG Lingjie, WANG Wei, WU Zhensheng, et al. Diagnosis model of HV SF₆ circuit breaker based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 246-249.
- [16] 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. ZHENG Pei, ZHAO Shutao, 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.
- [17] 胡涛, 刘海峰, 杜大全. 550 kV 罐式断路器局部放电在线检测[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 378-380. HU Tao, LIU Haifeng, DU Daquan. Online detection of partial discharge for a 550 kV tank breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 378-380.

收稿日期: 2016-12-20

作者简介:

黄绪勇(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力设备状态监测及评估、电力大数据应用分析等; E-mail: 15504024@qq.com

孙鹏(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为输变电设备状态评估、运维及检修。E-mail: ynspl@163.com

(编辑 魏小丽)