

基于 G1-独立性权数法的热带海岛环境 真空断路器状态评估

赵海龙^{1,2}, 庞松岭^{1,2}, 霍美屹^{1,2}, 黄廷城³, 黎智³

(1.海南电网有限责任公司电力科学研究院, 海口 570311; 2.热带智能电网实验室, 海口 570311;
3.中国电器科学研究院股份有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广州 510663)

摘要: **目的** 提高热带海岛环境下真空断路器状态评估方法的全面性和准确性, 为高温、高湿、高辐照、高盐雾气候环境下真空断路器的差异化运维和状态检修提供有效的数据基础。**方法** 统计分析热带海岛地区电力设备的缺陷类型和原因, 构建断路器的环境状态评价指标, 实现真空断路器的综合评价指标体系的拓展。采用序关系分析法(G1)和独立性权数法组合赋权, 实现断路器运行状态的综合评估。**结果** 通过实例分析验证了此真空断路器评估方法的可行性, G1-独立性权数法综合考虑了专家主观经验及指标数据客观规律, 能够降低指标间重复性信息对断路器评估结果的不利影响。**结论** G1-独立性权数法有效计及了真空断路器所处的环境状态, 综合考虑了主观经验和客观规律, 能够减小指标间重复信息所导致的指标权重误差, 保证了热带海岛环境下真空断路器评估结果的客观性和准确性。

关键词: G1法; 独立性权数法; 热带海岛; 真空断路器; 状态评估

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2021)11-0058-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.11.008

State Evaluation of Vacuum Circuit Breakers in Tropical Island Environment Based on G1-independence Weight Method

ZHAO Hai-long^{1,2}, PANG Song-ling^{1,2}, HUO Mei-yi^{1,2}, HUANG Ting-cheng³, LI Zhi³

(1.Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Co., Ltd, Haikou 570311, China; 2.Laboratory of Tropical Smart Grid, Haikou 570311, China; 3.State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510663, China)

ABSTRACT: In order to improve the comprehensiveness and accuracy of the vacuum circuit breaker condition assessment method in tropical islands, the paper provides an effective data basis for the differentiated operation and condition maintenance of vacuum circuit breakers under high temperature, high humidity, high radiation, and high salt spray climates. The paper ana-

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-05-09

Received: 2021-03-10; Revised: 2021-05-09

基金项目: 海南电网有限责任公司科技项目(073000KK52190006); 海南省科协青年科技英才创新计划项目(QCXM202010)

Fund: Supported by Hainan Power Grid Co., Ltd. Science and Technology Project (073000KK52190006), Hainan Association for Science and Technology Young Talents Innovation Program Project (QCXM202010)

作者简介: 赵海龙(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为输电线路故障研判、智能电网技术。

Biography: ZHAO Hai-long(1988—), Male, Master, Engineer, Research focus: power transmission line fault research and judgment, smart grid technology.

引文格式: 赵海龙, 庞松岭, 霍美屹, 等. 基于 G1-独立性权数法的热带海岛环境真空断路器状态评估[J]. 装备环境工程, 2021, 18(11): 058-065.

ZHAO Hai-long, PANG Song-ling, HUO Mei-yi, et al. State evaluation of vacuum circuit breakers in tropical island environment based on G1-independence weight method [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(11): 058-065.

lyzes the types and causes of defects in power equipment in tropical islands. The evaluation index of the environmental state of the switch is proposed, and the comprehensive evaluation index system of the outdoor vacuum circuit is expanded. The order relation analysis method (G1) and the independence weight method are used to carry out combined weighting to realize the comprehensive evaluation of the operating state of the circuit breakers. The feasibility of the proposed vacuum circuit breaker evaluation method is verified through case analysis. The G1-independence weight method comprehensively considers the subjective experience of experts and the objective law of index data, which can reduce the adverse effect of repetitive information between indexes on the evaluation results of circuit breakers. The proposed state evaluation method effectively takes into account the environmental state of the vacuum circuit breaker, comprehensively considers subjective experience and objective laws, can reduce the index weight error caused by the repeated information between the indicators, and ensures the vacuum circuit breaker in the tropical island environment, the objectivity and accuracy of the evaluation results of the device.

KEY WORDS: G1 method; independence weight method; tropical island; vacuum circuit; state evaluation

电网装备在热带海岛高温、高湿、高太阳辐照、高盐雾的气候环境下^[1]容易产生老化、腐蚀、渗漏、发热等缺陷,进而导致户外配电设备发生绝缘失效、开关拒动、短路、污闪等故障。真空断路器作为智能电网中的关键设备^[2],承担着保护与控制的双重功能,一旦发生故障会直接影响电网的供电可靠性^[3]。同时,户外断路器长期运行于户外复杂环境,且安装位置分散、运维困难,容易受气象环境影响产生缺陷,进而导致电网装备故障^[4],影响电网运行。

近年来我国电力设备逐步从定期检修模式向状态检修模式转变^[5],设备状态评估结果是制定状态检修策略的重要依据^[6]。科学合理评价热带海岛环境下真空断路器的运行状态是提高电力设备检修效率,保证电力系统安全稳定运行的重要手段。同时智能传感^[7]、物联网^[8]等技术的应用也为智能电网设备状态评价提供了必要的数据库。

国内外学者针对真空开关运行状态的评估已有不少研究。在评价指标方面,文献[5,9-10]均选取了反映开关机械特性的振动信号、表征电气开断能力的电寿命、反映绝缘性能的真空度和触头温度这 4 个状态量构建真空断路器的评价指标体系。文献[11]还采用分合闸线圈电流量指标来反映操作机构运行状态。为实现运行状态的综合评估,部分文献在断路器本体指标的基础上进行了状态参量扩充。文献[12]提出了通过控制器无故障工作时间、温湿度指标来反映断路器二次设备和运行环境的状态。文献[13]采用环境湿度、运行年限、负荷率、负荷转移能力等指标来反映配电开关的环境信息、运行信息和位置信息。其中,计及气象环境因素对电力设备进行状态评估是重要的发展趋势^[14-15]。然而,目前的研究仅考虑了环境温湿度参量,难以准确反映特殊环境下温度、湿度、太阳辐照、盐雾等环境参量对电网设备健康状态的影响。

真空断路器状态综合评估是一个多指标、多层级的评估过程,评估方法主要有:层次分析法^[12]、雷达图法^[11]、模糊综合评价法^[10]、灰色关联度法和逼近

理想点法^[9]。然而,上述方法存在指标赋权方法单一、不同指标间重复信息过多而导致评估结果不符合实际运行情况等问题。针对上述问题,本文重点研究了基于序关系分析(G1)-独立性权数法的户外真空断路器状态综合评估方法。首先,以我国南方热带岛屿为例,统计分析热带海洋环境下电网装备的缺陷类型和影响因素,基于分析结果,提出了涵盖多环境参量的真空断路器评价指标体系;接着,提出了基于G1-独立性权数法的主客观组合赋权方法,进而实现断路器状态综合评估;最后,通过实例分析验证所提指标体系和评估方法的有效性和可行性。

1 热带海岛环境缺陷类型分析

为充分了解热带海岛环境对配电设备运行的影响,本文从电网公司资产管理系统获取了海南电网 2014 年至 2018 年电力设备的缺陷数据进行统计分析。在热带海岛环境下,电网装备的典型缺陷主要有老化、腐蚀、发热异常、渗漏等。

1.1 老化

2014 年至 2018 年,海南电网电力设备老化缺陷涉及 35 kV 及以上变电站 149 座、线路 85 条;10 kV 及以下线路 450 条。海南电网配电设备老化缺陷主要包括开关机构与本体连杆处橡胶套老化破损、二次回路老化、密封圈老化、10 V 变压器绝缘套管破损脱落等。电气设备的老化程度主要与服役环境的温度、湿度、盐雾、污染介质以及负载率等因素有关。

1.2 腐蚀

2014 年至 2018 年,海南地区存在大面积电力设备锈蚀、卡涩缺陷,涉及 35 kV 及以上变电站 85 座、线路 34 条;10 kV 以下线路 195 条。其中,在缺陷部件中,柱上真空断路器因锈蚀、卡涩而造成的机构异常缺陷占比 43%,是受热带海岛特殊气候环境影响最大的设备之一。断路器腐蚀缺陷主要体现在两个方

面,一是本体表面、底座螺丝和闭锁装置等腐蚀严重;二是开关机构锈蚀、卡涩,接线端子锈蚀严重。

1.3 发热异常

海南电网设备发热异常缺陷涉及 35 kV 及以上变电站 227 座、线路 8 条; 10 kV 以下线路 133 条。发热异常缺陷主要发生在设备本体以及接头处,主要原因在于设备长期受到高温、高湿、盐雾、雨淋等气象条件,接头容易发生氧化、腐蚀,形成氧化膜,导致连接处接触电阻变大而引起发热;施工工艺未达到标准;湿热环境会降低电力设备的散热能力,导致设备热量累积、升温等。

1.4 渗漏

海南地区电力设备渗漏缺陷涉及 35 kV 及以上变电站 172 座, 10 kV 以下线路 32 条。渗漏缺陷,如 SF6 断路器气体渗漏、变压器漏油等,其原因主要是密封件老化和生产工艺问题。在热带海岛环境影响,尤其是高温环境下,橡胶密封件容易出现老化、塑性变形、龟裂等问题,最终失去效应导致气体或液体渗漏。

综上所述,高温、高湿、高辐照、高盐雾环境导致的老化、腐蚀、发热异常、渗漏等缺陷是海南地区常见的电力设备缺陷类型,平均每年发生 1363 起。其中在紧急和重大程度的缺陷中,10 kV 及以下设备占比分别达到 80%和 58%。海南岛不同地市的缺陷程度不同,分布情况如图 1 所示,图中数据来源于海南电网资产管理系统在 2014 年至 2018 年期间对各市县局电网设备的缺陷统计。

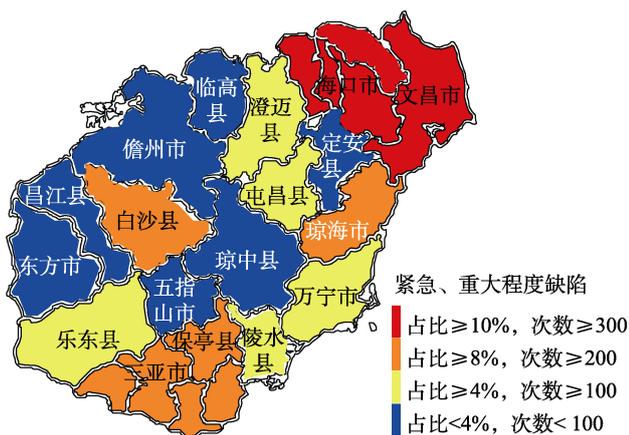


图 1 海南岛紧急、重大缺陷区域分布

Fig.1 Distribution map of emergency and major defects in Hainan Island

由图 1 可以看出,文昌、海口、三亚、琼海等地的电气设备缺陷问题最为明显,海南岛东北部和南部沿海地区的缺陷问题要高于其他地区,这是由于海南岛受热带季风气候影响,东北部沿海地区迎风坡雨量多,西部沿海背风、雨量少。由上述分析可知,电气

设备缺陷问题受气象环境因素影响较大。

通过上述统计分析可知,热带海岛的高温、高湿、高辐照、高盐雾环境对电力设备运行状态有显著影响。因此,有必要选取全面、合适的气象环境参量,实现真空断路器的状态综合评估,为真空断路器的状态检修奠定基础。

2 真空断路器评价指标体系

随着断路器状态评价技术的发展,越来越多的研究将运行环境因素列为断路器的重要评价参量。文献[12-13]将环境温度和湿度作为断路器的评价指标;文献[16]综合考虑了温度、湿度、污秽度等参量,对集成式隔离断路器状态进行了综合评估。然而,当前研究只考虑了温湿度等基本的环境状态参量,难以评估特殊气候环境下真空断路器的运行特点。因此,本节基于热带海岛电网装备的缺陷数据分析,选取了环境温度、湿度、太阳辐照度、盐雾浓度、雨量等指标作为真空断路器运行环境的评价参量,对其进行状态评估。其中,真空断路器的评价指标体系包括开关本体部分和运行环境部分。

2.1 开关本体评价指标

据统计,操动机构、控制回路、主回路是真空断路器故障率最高的部件^[9],其故障原因主要包括操动机构失灵、触头烧蚀、灭弧室真空度下降、隔离触头接触不良等。因此,结合真空断路器的运行经验以及相关研究成果^[5,9-11],选取表征机械故障特性的振动信号、反映电流开断能力的电寿命、表征电气绝缘性能的真空气体和触头温度这 4 个状态参量作为真空断路器本体部分的状态评价指标^[5],各指标的数据获取和计算方法见文献[11]。

2.2 运行环境评价指标

根据对海南电网历史缺陷数据的统计分析可知,高温、高湿、高辐照、高盐雾等环境因素是海南电网装备典型缺陷的重要诱因。根据缺陷分析结果,构建了表征真空断路器运行环境的状态评价指标体系。

1) 环境温度。环境温度是设备老化、腐蚀、渗漏等缺陷的重要影响因素,环境温度还直接影响设备与外界的热量交换^[17],进而影响设备自身的温度。高温环境会加速设备材料老化、金属腐蚀、密封件变形失效过程,加剧设备热量累积,是影响真空断路器运行状态的重要参量。

2) 湿度。热带海岛的湿热海洋大气环境空气湿度非常大,金属材料表面容易形成一定厚度的水膜,导致锈蚀加剧。长期户外运行状态下的真空断路器本体表面、操动机构、底座、航空插头等均容易在高湿环境下发生锈蚀。

3) 太阳辐照度。长期高太阳辐照会引起户外断

断路器的防护涂层失去光泽、变色、粉化、开裂、脱落等，最终导致涂层下的金属发生老化，严重时会影响断路器的绝缘性能和机械性能。

4) 盐雾浓度。海岛环境下空气的含盐量高，盐雾中的氯离子与高湿大气环境共同作用，加速配电开关设备金属部分的腐蚀破坏，导致机械部件和操动机构卡涩、失灵等缺陷或故障。

5) 雨量。海岛湿热环境下，户外断路器容易在下雨等多种气象条件下发生金属接头氧化、腐蚀，形成氧化膜，导致连接处接触电阻变大而引起设备异常发热。

此外，上述 5 个服役环境因素对真空断路器运行状态的影响是通过设备服役时间的增加逐渐累积的^[17]，因此，本文还设置了服役年限作为评价指标，以表征在不同服役年限下气候环境因素对真空断路器的影响。真空断路器评价指标体系如图 2 所示。

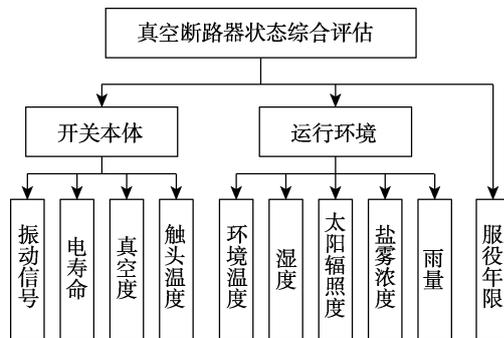


图 2 真空断路器综合评价指标体系

Fig.2 Comprehensive evaluation index system of vacuum circuit breaker

3 基于 G1-独立性权数法的状态评估方法

由于真空断路器状态评价指标体系包含不同类型的多个指标，指标之间不可避免地会存在部分信息重复。因此本文提出一种 G1-独立性权数法的组合赋权方法，通过 G1 法对指标进行主观赋权，通过独立性权数法对指标进行客观赋权，通过组合赋权计算指标的综合权重，标准化处理的指标与相应综合权重的乘积之和即为断路器的状态评估值，进而根据评估值的大小得到状态评估结果。采用主客观权重融合的方法，能够降低人为主观因素对真空断路器状态评估结果的影响，同时独立性权数法能够在一定程度上减小指标间信息重复的问题，进而保证评价结果客观有效。

3.1 G1 法确定主观权重

采用 G1 法确定真空断路器状态评价指标的主观权重。G1 法灵活可调、操作简单，无需进行一致性

校验，相比于层次分析法更适合评价指标多的场景，能够快速准确地确定指标的主观权重。G1 法确定指标权重的步骤如下：

1) 根据断路器实际运行要求和专家经验，按重要程度由高到低确定所有指标的序关系，排序后的结果记为：

$$X_1 > X_2 > \dots > X_m \quad (1)$$

式中： m 为指标个数； $X_j(j=1,2,\dots,m)$ 为按重要程度由高到低排序后的第 j 个指标。

2) 根据专家经验判断确定相邻两个评估指标的重要程度之比，记 r_j 为指标 X_j 的重要程度值 w_j 与指标 X_{j+1} 的重要程度 w_{j+1} 之比， r_j 的取值及其含义见表 1。

表 1 r_j 的赋值参考
Tab.1 Assignment reference table of r_j

| r_j | 含义 |
|-------|-----------------------------|
| 1.0 | 指标 X_j 与指标 X_{j+1} 同样重要 |
| 1.2 | 指标 X_j 比指标 X_{j+1} 稍微重要 |
| 1.4 | 指标 X_j 比指标 X_{j+1} 明显重要 |
| 1.6 | 指标 X_j 比指标 X_{j+1} 强烈重要 |
| 1.8 | 指标 X_j 比指标 X_{j+1} 极端重要 |

3) 根据相邻指标间的重要程度比值 r_j ，可计算各指标的重要程度值 w_j ，见式(2)—(3)：

$$w_m = \left(1 + \sum_{j=1}^{m-1} \prod_{i=j}^{m-1} r_i \right)^{-1} \quad (2)$$

$$w_j = r_{j+1} w_{j+1} (j = m-1, \dots, 2, 1) \quad (3)$$

通过式(2)可计算得到第 m 个指标的重要程度值，再通过式(3)依次前推计算可得到第 $m-1$ 、 $m-2$ 、 \dots 、1 个指标的重要程度值。

4) 对指标的重要程度值进行归一化计算，将归一化处理结果作为指标的主观权重值，如式(4)。

$$W_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (4)$$

式中： W_j 为指标 X_j 的主观权重值。

3.2 独立性权数法确定客观权重

独立性权数法是一种根据多元回归分析法计算复相关系数进而确定指标客观权重的方法^[18]。复相关系数是度量一个因变量与一组因变量间重复相关程度的重要指标^[19]，若指标 X_j 与其他指标的复相关系数越大，表明指标包含的重复信息越多，则指标 X_j 的客观权重应越小越好，以减小重复信息量对评估结果的影响。采用复相关系数的倒数进行归一化处理的结果作为客观权重，能够有效解决真空断路器多个评价指标之间信息重复的问题。采用独立性权数法计算

指标客观权重的步骤如下。

1) 指标数据的标准化处理。采用多指标对断路器运行状态进行综合评估,为消除各指标量纲和数量级不同的影响,先对指标数据进行标准化处理。假定待评估的真空断路器共 n 个,评价指标共 m 项,将第 i 台真空断路器的第 j 项指标实测值记为 x_{ij} , 如式 (5):

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{X} 为 n 个真空断路器的评价指标的原始数据矩阵。

真空断路器的开关本体指标(振动信号、电寿命、真空度、触头温度)的标准化处理公式见式(6):

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{x_j^h - x_{ij}}{x_j^h - x_j^l} & x_{ij} \in [x_j^l, x_j^h] \\ \frac{x_{ij} - x_j^h}{x_j^l - x_j^h} & x_{ij} \in [x_j^h, x_j^l] \end{cases} \quad (6)$$

式中: x'_{ij} 表示第 i 台真空断路器第 j 项指标归一化的指标值,数值越大,则指标状态越优,且规定 $0 \leq x'_{ij} \leq 1$; x_j^l 与 x_j^h 分别为第 j 项指标最高等级运行区间的左边界值和最低等级运行区间的右边界值^[5]。

真空断路器运行环境指标(环境温度、湿度、太阳辐照度、盐雾浓度、雨量、服役年限)的标准化处理公式为:

$$x'_{ij} = \frac{\max(\mathbf{X}_j) - x_{ij}}{\max(\mathbf{X}_j) - \min(\mathbf{X}_j)} \quad (7)$$

式中: x'_{ij} 数值越大,表示指标状态越优; \mathbf{X}_j 为矩阵 \mathbf{X} 的第 j 列。

2) 计算指标的复相关系数。指标 X_j 的复相关系数 R_j 的计算公式为:

$$R_j = \frac{\sum_{j=1}^m (\mathbf{X}_j - \bar{\mathbf{X}})(\tilde{\mathbf{X}} - \bar{\mathbf{X}})}{\sum_{j=1}^m (\mathbf{X}_j - \bar{\mathbf{X}})^2 \sum_{j=1}^m (\tilde{\mathbf{X}} - \bar{\mathbf{X}})^2} \quad (8)$$

式中: $\tilde{\mathbf{X}}$ 表示矩阵 \mathbf{X} 中除去 \mathbf{X}_j 的剩余矩阵; $\bar{\mathbf{X}}$ 为矩阵 \mathbf{X} 的平均值。

3) 对复相关系数的倒数进行标准化处理得到指标的客观权重值,处理公式为:

$$\sigma_j = \frac{R_j^{-1}}{\sum_{j=1}^m R_j^{-1}} \quad (9)$$

式中: σ_j 表示指标 X_j 的客观权重值。

3.3 组合权重

G1 法算得的指标主观权重和独立性权数法算得的客观权重可通过最小二乘法进行组合优化^[20],目标函数为:

$$\min F(\theta_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{[(\theta_j - W_j)x'_{ij}]^2 + [(\theta_j - \sigma_j)x'_{ij}]^2\} \quad (10)$$

式(10)中: θ_j 为指标的综合权重值。

约束条件为:

$$\sum_{j=1}^m \theta_j = 1 \quad (11)$$

$$\theta_j \geq 0 (j=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

求解上述模型可得到指标的最优组合权重值。

3.4 计算状态评估值与确定评估结果

根据前述计算得到的指标标准化结果和指标组合权重值,可计算第 i 台真空断路器的状态评估数值(百分制) P_i , 如式(13)所示:

$$P_i = 100 \times \sum_{j=1}^m \theta_j x'_{ij} \quad (13)$$

参照国家电网公司《配网设备状态评价导则》(Q/GDW645—2011)^[21]将真空断路器的状态评估结果等级划分为正常状态、注意状态、异常状态及严重状态4级,见表2。

表2 真空断路器的状态评估结果等级

| Tab.2 Vacuum circuit breaker status assessment result level | | | | |
|---|--------|----------|----------|---------|
| 状态评估值 | 85~100 | 75~85(含) | 60~75(含) | 60(含)以下 |
| 评估结果 | 正常状态 | 注意状态 | 异常状态 | 严重状态 |

根据式(13)计算真空断路器的状态评估值后,根据表2的对应关系即可得到真空断路器的状态评估结果。

4 算例分析

4.1 真空断路器原始数据

为了验证基于G1-独立性权数法的真空断路器状态评估方法的可行性,选取了海南地区15台柱上真空断路器数据进行实例分析。其中5台典型真空断路器的原始指标数据见表3。断路器本体指标数据来源于现场监测结果,环境指标数据来源于当地气象局发布的数据,服役年限数据从设备台账中获取。

4.2 评估指标组合权重的确定

邀请真空断路器研发与运维的相关专家采用G1法确定指标重要程度排序以及相邻两个评估指标的重要程度之比,见表4。

表 3 典型真空断路器的原始指标数据
Tab.3 Raw index data of a typical vacuum circuit

| | 振动信号 (p. u.) | 电寿命/ % | 真空度/ MPa | 触头温度/ ℃ | 环境温度/ ℃ | 湿度/ % | 盐雾浓度/ (mg·m ⁻² ·d ⁻¹) | 太阳辐照度/ (kW·h·(m ² ·a) ⁻¹) | 雨量/ (mm·a ⁻¹) | 服役年限 /a |
|-------|-----------------|-----------|-------------|------------|------------|----------|---|---|------------------------------|------------|
| 断路器 A | 0.9 | 37 | 0.7 | 52 | 23.4 | 75 | 22 | 1390 | 1490 | 2 |
| 断路器 B | 1.0 | 40 | 0.9 | 49 | 23.6 | 78 | 46 | 1480 | 1620 | 2 |
| 断路器 C | 2.5 | 25 | 3.3 | 76 | 23.6 | 69 | 42 | 1420 | 1440 | 8 |
| 断路器 D | 3.1 | 23 | 2.9 | 57 | 22.8 | 85 | 21 | 1580 | 1510 | 3 |
| 断路器 E | 4.2 | 18 | 6.4 | 47 | 24.1 | 79 | 83 | 1460 | 1720 | 1 |

表 4 评估指标重要程度之比
Tab.4 Ratio of importance of evaluation indicators

| 指标 | 振动信号 | 真空度 | 电寿命 | 触头温度 | 服役年限 | 湿度 | 盐雾浓度 | 环境温度 | 太阳辐照度 | 雨量 |
|----------------|------|-----|-----|------|------|-----|------|------|-------|----|
| r _j | 1.2 | 1.4 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | 1.2 | 1.0 | 1.0 | \ |

按照式 (2) — (4) 可计算得到指标主权重。

同时, 将表 3 中真空断路器的原始指标数据按照式 (6) 和式 (7) 进行标准化处理, 其中断路器本体各项指标的参考样本区间参见文献[5]和表 2, 标准化处理结果见表 5。

根据真空断路器运行数据的标准化处理结果, 采用独立性权数法进行客观赋权, 按照式 (8) 和式 (9) 可计算得到指标客观权重。采用最小二乘法进行组合优化, 按照式 (10) — (12) 可算得指标的最优组合权重值, 见表 6。

表 5 典型真空断路器的标准化处理结果
Tab.5 Standardized processing results of a typical vacuum circuit

| 指标 | 振动信号 | 电寿命 | 真空度 | 触头温度 | 环境温度 | 湿度 | 盐雾浓度 | 太阳辐照度 | 雨量 | 服役年限 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 断路器 A | 0.981 | 0.914 | 0.930 | 0.825 | 0.595 | 0.654 | 0.984 | 0.864 | 0.821 | 0.875 |
| 断路器 B | 0.962 | 1.000 | 0.910 | 0.900 | 0.460 | 0.481 | 0.597 | 0.455 | 0.357 | 0.875 |
| 断路器 C | 0.673 | 0.571 | 0.670 | 0.225 | 0.460 | 1.000 | 0.661 | 0.727 | 1.000 | 0.125 |
| 断路器 D | 0.558 | 0.514 | 0.710 | 0.700 | 1.000 | 0.077 | 1.000 | 0.000 | 0.750 | 0.750 |
| 断路器 E | 0.346 | 0.371 | 0.360 | 0.950 | 0.122 | 0.423 | 0.000 | 0.545 | 0.000 | 1.000 |

表 6 评价指标权重值对比
Tab. 6 Comparison of evaluation index weight values

| 评价指标 | 振动信号 | 电寿命 | 真空度 | 触头温度 | 环境温度 | 湿度 | 盐雾浓度 | 太阳辐照度 | 雨量 | 服役年限 |
|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|
| G1 法 | 17.39 | 10.35 | 14.49 | 10.35 | 7.19 | 8.62 | 8.62 | 7.19 | 7.19 | 8.62 |
| 独立性权数法 | 16.59 | 10.64 | 13.43 | 10.85 | 7.83 | 6.13 | 10.07 | 7.42 | 6.20 | 10.85 |
| 组合赋权 | 17.14 | 10.44 | 14.23 | 10.51 | 7.31 | 7.09 | 9.37 | 7.36 | 6.59 | 9.96 |

4.3 断路器状态评估结果

根据表 6 的指标标准化处理结果, 以及表 6 的指标权重值, 按照式 (13) 可计算得到基于 G1-独立性权数法的真空断路器状态评估结果。此外, 为方便对分析文中所提评价指标体系和评估方法的有效性, 本节按照文献[5,9-10]所选取的指标体系 (即仅考虑开关本体的 4 个指标), 采用 G1-独立性权数法进行状态评估, 以对比不同指标体系的评价结果差异, 评估结果见表 7。

表 7 中, 方案 1 为计及环境数据的指标体系, 采用 G1 法评估; 方案 2 为计及环境数据的指标体系, 采用独立性权数法评估; 方案 3 为文献[5,9-10]所选

表 7 断路器的评估结果对比
Tab.7 Comparison of evaluation results of circuit breakers

| | | 断路器 A | 断路器 B | 断路器 C | 断路器 D | 断路器 E |
|------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 方案 1 | 状态评估值 | 86.6 | 75.5 | 60.8 | 60.9 | 42.0 |
| | 评估结果 | 正常 | 注意 | 异常 | 异常 | 严重 |
| 方案 2 | 状态评估值 | 87.0 | 76.2 | 58.0 | 63.0 | 43.3 |
| | 评估结果 | 正常 | 注意 | 严重 | 异常 | 严重 |
| 方案 3 | 状态评估值 | 92.3 | 94.3 | 56.4 | 61.9 | 47.4 |
| | 评估结果 | 正常 | 正常 | 严重 | 异常 | 严重 |
| 方案 4 | 状态评估值 | 86.9 | 76.1 | 59.2 | 62.0 | 42.8 |
| | 评估结果 | 正常 | 注意 | 严重 | 异常 | 严重 |

取的指标体系,采用 G1-独立性权数法评估;方案 4 为计及环境数据的指标体系,采用 G1-独立性权数法评估。

通过雷达图将断路器各指标标准化处理结果与各断路器的平均指标水平对比,可直观体现该真空断路器的运行状态,图 3 给出了断路器 A、B 运行状态与平均指标水平的对比雷达图。

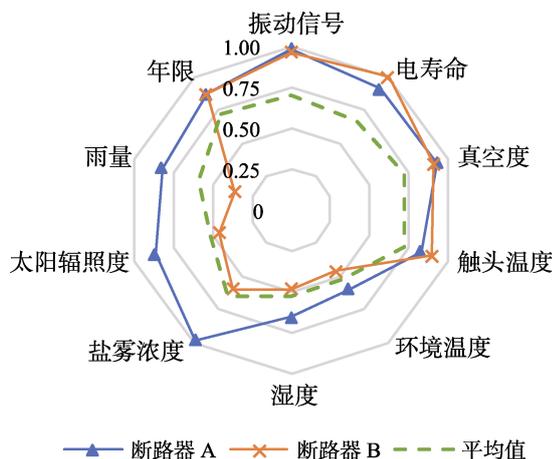


图 3 断路器 A、B 与平均水平指标对比雷达图

Fig.3 Comparison between index value of circuit breakers with average value in a radar map

由表 7 和图 3 的真空断路器评估结果可以看出:

1) 对比断路器 A 和断路器 B 的指标数据可知,断路器 A 和 B 的开关本体指标数据都高于平均水平,运行情况良好。若按照方案 3 的不计及环境状态的真空断路器评估指标体系来进行评估,断路器 A 和 B 均处于正常状态。而采用计及气候环境因素的评价指标体系进行评估时(方案 1、2、4),断路器 A 为正常状态;而断路器 B 由于运行环境状态明显低于平均水平,总体评估结果为注意状态,可提醒运维人员在设备巡视过程中多加关注。采用本文所提的评价指标体系能够有效反映出真空断路器的运行环境状态,进而及时发现和预防在高温、高湿、高盐雾环境下可能导致的真空断路器缺陷,指导热带海岛地区断路器的智能化和差异化运维。

2) 对比不同案例下断路器 C 的评估结果可知,采用 G1 法进行评估时,断路器 C 为异常状态;采用 G1-独立性权数法进行评估时,断路器 C 为严重状态。实际上断路器 C 现场检测的触头温度为 76℃,已严重发热,需及时更换,所以 G1-独立性权数法的评估结果更准确。仅采用 G1 法时,由于运行环境等指标相关性大、重复信息多,导致断路器 C 的评价结果比实际情况好。而采用 G1-独立性权数法则能够有效降低相关性大的指标权重,避免指标间的重复性信息导致评估结果不够客观准确的情况发生。

3) 断路器 D 的开关本体指标处于注意向异常过渡的阶段,湿度、太阳辐照度等服役环境状态也较为

恶劣,4 种方案的评价结果均为异常状态;断路器 E 的振动信号、真空度和电寿命指标均处于较恶劣的状态,同时由于安装位置离海近,盐雾浓度高,运行环境较为恶劣,4 种方案的评价结果均为严重状态。可以看出,评估结果与实际运行情况基本相符,所提的指标体系和评估方法具有一定的可行性和有效性。

5 结论

1) 高温、高湿、高辐照、高盐雾环境导致电力设备出现老化、腐蚀、发热异常、渗漏等缺陷,占电网设备总缺陷数量的 64%。

2) 综合评价真空断路器运行状态的重要指标包括振动信号、电寿命、真空度、触头温度、环境温度、湿度、太阳辐照度、盐雾浓度、雨量和服役年限。

3) G1-独立性权数法综合计及了专家主观经验和数据客观规律,能够有效降低指标间重复信息对真空断路器评估的影响,保证了状态评价结果的客观性和准确性,通过算例分析得到评估结果与实际运行情况相符。

参考文献:

- [1] 史训涛,黎智,陈川,等. 湿热环境下配电自动化终端的腐蚀失效分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 95-100.
SHI Xun-tao, LI Zhi, CHEN Chuan, et al. Corrosion failure of distribution automation terminal in hot and humid environment[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(7): 95-100.
- [2] 陈国平,张峰,张俊娜,等. 高压断路器灭弧室瓷套低温力学特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 190-195.
CHEN Guo-ping, ZHANG Feng, ZHANG Jun-na, et al. Research on mechanical property of porcelain bushing of high voltage circuit-breaker arcing chamber under low temperature[J]. Insulators and surge arresters, 2019(4): 190-195.
- [3] LI Geng-feng, HUANG Yu-xiong, BIE Zhao-hong, et al. Machine-learning-based reliability evaluation framework for power distribution networks[J]. IET generation, transmission & distribution, 2020, 14(12): 2282-2291.
- [4] 吕旺燕,黄建业,阮红梅,等. 湿热海洋环境下接插件带电腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 102-109.
LYU Wang-yan, HUANG Jian-ye, RUAN Hong-mei, et al. Corrosion behavior of charged connectors in wet and heat marine environment[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(2): 102-109.
- [5] 王泉,周云海,姚俊伟,等. 基于组合赋权和理想区间法的真空断路器状态评估[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 39-45.
WANG Quan, ZHOU Yun-hai, YAO Jun-wei, et al. State

- evaluation of vacuum circuit breaker based on combination weighting and ideal interval method[J]. High voltage apparatus, 2019, 55(4): 39-45.
- [6] FAURIAT W, ZIO E. Optimization of an aperiodic sequential inspection and condition-based maintenance policy driven by value of information[J]. Reliability engineering & system safety, 2020, 204: 107133.
- [7] 于力, 焦在滨, 王晓鹏, 等. 基于 PMU 的中压配电网精确故障定位方法及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 30-38.
YU Li, JIAO Zai-bin, WANG Xiao-peng, et al. Accurate fault location scheme and key technology of medium-voltage distribution network with synchrophasor measurement units[J]. Automation of electric power systems, 2020, 44(18): 30-38.
- [8] AKPAKWU G A, SILVA B J, HANCKE G P, et al. A survey on 5G networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges[J]. IEEE access, 2018, 6: 3619-3647.
- [9] 李济沅, 邱玉婷, 于竞哲, 等. 基于灰色关联度和 TOPSIS 的真空断路器运行状态综合评估[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 242-247.
LI Ji-yuan, QIU Yu-ting, YU Jing-zhe, et al. State complex evaluation of vacuum circuit breaker based on grey correlation degree and TOPSIS method[J]. High voltage apparatus, 2017, 53(3): 242-247.
- [10] 杨凡, 何晋, 王泉, 等. 相对熵赋权法下中压真空断路器状态的灰云—模糊熵评估模型[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 204-210.
YANG Fan, HE Jin, WANG Quan, et al. Grey cloud-fuzzy entropy evaluation model for medium voltage vacuum circuit breaker state based on relative entropy combined weight method[J]. High voltage apparatus, 2020, 56(6): 204-210.
- [11] 李海英, 冯冬, 宋建成. 中压真空断路器状态的雷达图法评估模型[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2053-2059.
LI Hai-ying, FENG Dong, SONG Jian-cheng. Condition-based assessment model of MV vacuum circuit breaker with radar chart method[J]. Power system technology, 2013, 37(7): 2053-2059.
- [12] 黄智鹏, 熊洽, 陈家超, 等. 基于改进层次分析法的柱上开关成套设备状态评估研究[J]. 广东电力, 2020, 33(3): 88-95.
HUANG Zhi-peng, XIONG Qia, CHEN Jia-chao, et al. Research on the state evaluation of complete equipment of column switch based on improved analytic hierarchy process[J]. Guangdong electric power, 2020, 33(3): 88-95.
- [13] 亢超群, 李二霞, 盛万兴, 等. 基于多源信息融合的配电真空开关柜动态状态评价研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 235-241.
KANG Chao-qun, LI Er-xia, SHENG Wan-xing, et al. Dynamic condition assessment for distribution vacuum switch cabinets based on multi-source information fusion[J]. High voltage apparatus, 2017, 53(3): 235-241.
- [14] 段涛, 罗毅, 施琳, 等. 计及气象因素的输电线路故障概率的实时评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 59-67.
DUAN Tao, LUO Yi, SHI Lin, et al. A real-time fault probability evaluation model of transmission line considering meteorological factors[J]. Power system protection and control, 2013, 41(15): 59-67.
- [15] 时亚军, 顾洁, 李楠, 等. 基于多源数据融合的恶劣气象下 10 kV 配变实时状态评估[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 448-460.
SHI Ya-jun, GU Jie, LI Nan, et al. Real-time state assessment of 10 kV distribution transformer under severe weather based on multi-source data fusion[J]. High voltage engineering, 2020, 46(2): 448-460.
- [16] 李劲彬, 夏天, 黄烁, 等. 基于 XGBoost 的集成式隔离断路器状态评估[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1800-1806.
LI Jin-bin, XIA Tian, HUANG Shuo, et al. State assessment for integrated disconnecting circuit breaker based on XGBoost[J]. High voltage engineering, 2020, 46(5): 1800-1806.
- [17] 王辉, 郝丽丽, 黄梅, 等. 基于历史故障信息的配电网设备故障概率建模[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 76-84.
WANG Hui, HAO Li-li, HUANG Mei, et al. Failure probability model of distribution network equipment based on historical fault information[J]. Electric power automation equipment, 2020, 40(3): 76-84.
- [18] 张淑莹, 胡友彪, 邢世平. 基于独立性权-灰色关联度理论的突水水源判别[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 36-41, 62.
ZHANG Shu-ying, HU You-biao, XING Shi-ping. Discrimination of the mine water inrush source based on principal component analyses-theory of gray relational degree[J]. Hydrogeology & engineering geology, 2018, 45(6): 36-41, 62.
- [19] 艾欣, 赵旭州, 胡寰宇, 等. G1-熵权-独立性权法在电网发展态势感知中的应用[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3481-3490.
AI Xin, ZHAO Xu-zhou, HU Huan-yu, et al. G1-entropy-independence weight method in situational awareness of power grid development[J]. Power system technology, 2020, 44(9): 3481-3490.
- [20] 黄廷城, 叶琳浩, 张勇军. 基于 AHP-熵权法的配电网用电可靠性综合评估[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 44-50.
HUANG Ting-cheng, YE Lin-hao, ZHANG Yong-jun. Comprehensive evaluation on electricity consumption reliability of power distribution network based on AHP-entropy weight method[J]. Guangdong electric power, 2018, 31(1): 44-50.
- [21] Q/GDW645-2011, 配网设备状态评价导则[S].
Q/GDW645-2011, Guidelines of condition assessment for electric distribution network equipments[S].