

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.037

基于多源信息融合的配电真空开关柜动态状态评价研究

亢超群¹, 李二霞¹, 盛万兴¹, 张建华², 常方圆¹, 程 序³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 作为配电网主设备之一, 开关柜的状态直接影响着电网的整体运行效果以及用户的用电质量, 针对当前开关柜状态评价的信息完备性低、动态性差等问题, 提出了一种基于多源信息融合的配电真空开关柜状态评价模型。文中选取开关柜的超声波值、暂态地电波 (TEV) 值、红外测温值、真空度、绝缘电阻、机械性能参数等信息, 将真空开关柜分成断路器、母线、出线电缆 3 部分进行状态评价, 并融合开关柜整体所处的环境信息、运行信息以及开关柜在电网中的位置信息, 采用隶属度函数和比例模型, 建立开关柜状态评价模型, 并将模型应用于过去 5 年内的 20 个时段, 分别计算出 20 次状态评价结果, 并采用贝叶斯条件概率模型, 计算开关柜的未来状态处于各等级的概率。同时给出了相关算例对所提方法进行说明, 验证了模型的有效性, 并传统的概率计算模型相比, 证明文中所提方法更符合电力设备的实际运行情况。

关键词: 状态动态评价; 多源信息融合; 贝叶斯网络; 配电开关柜

Dynamic Condition Assessment for Distribution Vacuum Switch Cabinets Based on Multi-source Information Fusion

KANG Chaoqun¹, LI Erxia¹, SHENG Wanxing¹, ZHANG Jianhua²,
CHANG Fangyuan¹, CHENG Xu³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: Vacuum switch cabinet is one of the most important equipments in power distribution system, so its state has significant influence on the safety of the distribution network and the power quality at customs side. However, the information for condition assessment of distribution switch cabinet is insufficient, and the assessment model is not dynamic. In this paper, a vacuum switch cabinet condition assessment model based on multi-source information fusion is proposed. This model includes such information as ultrasound values, TEV values, infrared temperature, vacuum degree, insulation resistance and mechanical parameters. The vacuum switch cabinet is divided into vacuum circuit breaker, buses, and outlet cable for condition assessment. The environment information, operation information and position information of the vacuum switch cabinet are also taken into consideration. Moreover, membership functions and proportional model are employed in the condition assessment. Then Bayes conditional probability model is used to predict the future condition of the vacuum switch cabinet. In addition, examples are given to prove the validity of the proposed vacuum switch cabinet condition assessment model. Compared with conventional probability calculation model, the proposed model shows better consistency with operation condition of electric power equipments.

Key words: dynamic condition assessment; multi-source information fusion; Bayes network; distribution switch cabinet

收稿日期:2016-10-19; 修回日期:2017-01-06

0 引言

近年来,随着状态检修技术的发展,作为其基础的电力设备状态评价也得到了相应的重视,同时带电检测和在线监测技术的发展也为设备状态评价提供了良好的数据来源^[1-2]。但相对于输电设备而言,配电设备由于数量多、种类繁多、电压等级低等原因,在状态评价方面的研究较少。2011 年,国家电网公司发布了《配网设备状态评价导则》(Q/GDW 645—2011)^[3],导则采用扣分制对配电设备进行状态评价,方法基本沿袭了《输电设备状态评价导则》,评价选取的指标过多,且许多指标的获取困难,各类信息的融合度也不够高。针对导则的不足之处,许多学者做出了改进,常用的方法有:神经网络法^[4-5]、层次分析法^[6]、模糊理论^[7-9]以及聚类算法^[10-11],但研究内容以变压器居多。对于开关柜状态评价,国内的研究还处于起步阶段:文[12]采用抽样方法对开关柜进行整体评价,采用在线监测数据进行个体评价;文[13]采用模糊评判法建立 10 kV 真空开关柜状态评价系统,并对评价结果不良的设备建立了基于神经网络的健康诊断系统;文[14-15]分别采用突变级数法和模糊综合评判法对开关柜进行状态评价,解决了状态量缺失问题。以上研究均从设备个体出发,缺乏对电网整体运行情况的考虑,另外,评价方法均为静态评价,无法预测开关柜的未来状态。

针对以上不足,文中将开关柜分为断路器、母线、出线电缆 3 部分,并综合考虑开关柜整体运行的环境信息、运行信息以及开关柜在配电网中的位置信息,采用隶属度函数和比例模型,将这 6 部分信息量化并进行有效融合,得出开关柜的整体状态评价结果。在此基础上,采用贝叶斯网络融合开关柜在过去 5 年内的最近 20 次状态评价结果,对该开关柜未来所处状态等级进行概率计算,建立动态评价模型。

1 状态评价的信息源及状态等级

1.1 多源信息融合的概念

多源信息融合技术兴起于 20 世纪 70 年代,用来研究对多源不确定性信息进行综合处理及利用^[16]。常见的信息融合方法有:人工神经网络法、贝叶斯网络法、模糊推理法、Dempster-Shafer 推理法等^[17]。与单源信息评价方法相比,多源信息融合技术的采用,可以提高系统的鲁棒性和准确性。

1.2 信息源及状态量的确定

根据《电网设备状态检测技术应用典型案例》^[18]及相关资料,10 kV 真空开关柜的机械性能和电气

性能主要由真空断路器、母线和出线电缆的性能决定,因此,文中将开关柜分为真空断路器、母线、出线电缆 3 部分。

开关柜最常出现的故障为局放和过热,对局放的检测,以暂态对地电压法(TEV)和超声波法最为成熟;对过热故障的检测,以红外测温最为成熟;开关柜的真空度决定了开关柜的灭弧和绝缘能力;断路器的分、合闸时间是考察其机械性能的主要参数。另外,环境的湿度对开关柜的绝缘性能有着较大影响;运行年限直接决定了开关柜的健康状态;长期过负荷会引起柜体发热。

从电网整体运行角度考虑,设备在电网中的位置也需纳入信息源范围:处于主干线路的设备发生故障时,一般能通过联络开关有效转移负荷,而对于线路末端的设备,故障时,负荷得不到有效转移,将影响居民用电,因此,这类设备应该优先得到检修,在其状态评价的结果上要体现出优先级来^[19]。

综上,文中进行真空开关柜状态评价的信息来源主要有设备的例行试验信息、运检信息、环境信息、运行信息、在电网中的位置信息等,将真空开关柜的状态量总结见表 1。

表 1 真空开关柜状态量总结

Table 1 Summary of vacuum switch cabinet condition assessment items

评价部分	状态量	对应状态
断路器	TEV 值、超声波值	局部放电的严重程度
	红外测温值	过热现象的严重程度
	真空度	灭弧和绝缘能力
	分、合闸时间	机械性能
母线	母线与断路器连接处温度	过热现象的严重程度
	TEV 值、超声波值	局部放电的严重程度
	绝缘电阻	绝缘性能
出线电缆	电缆接头处温度	过热现象的严重程度
环境信息	TEV 值、超声波值	局部放电的严重程度
	环境湿度	环境湿度
运行信息	运行年限	投运时长
	负荷率	负荷情况
位置信息	负荷转移能力	在电网中的重要程度

1.3 状态等级的划分

为了兼顾评价结果的准确性和计算量的合理性,将评价结果分为 5 个等级:A(优)、B(良)、C(中)、D(较差)、E(差),见表 2。

2 分层评估模型

2.1 状态量的归一化处理

为了弥补半梯模型容易造成数据丢失问题,

表 2 真空开关柜状态等级描述

Table 2 Condition grades of vacuum switch cabinet

状态等级	状态描述
A	各部件工作状态良好,可以延迟检修。
B	大部分部件状态良好,按计划检修。
C	各部件状态合格,主要部件有不严重的损害,优先检修。
D	有部件出现明显故障,尽快安排检修。
E	大部分部件出现明显故障,立即检修。

采用半岭模型进行评价^[20]。半岭模型分为升半岭模型和降半岭模型,升半岭模型用于评价数值越大越好的状态量,见式(1);降半岭模型用于评价数值越小越好的状态量,见式(2)。其中, a 和 b 分别代表上、下限评分阈值。

$$y(x)=\begin{cases} 0 & 0\leq x<a \\ 50+50\sin[\frac{\pi}{b-a}(x-\frac{a+b}{2})] & a\leq x<b \\ 100 & x\geq b \end{cases} \quad (1)$$

$$y(x)=\begin{cases} 100 & 0\leq x<a \\ 50-50\sin[\frac{\pi}{b-a}(x-\frac{a+b}{2})] & a\leq x<b \\ 0 & x\geq b \end{cases} \quad (2)$$

对于一些定量状态量,如超声波值、TEV 值、真空度、红外测温值、分合闸速度、环境温湿度、负荷率等状态量,可在数据归一化时,采用半岭模型处理。

下面说明各状态量评分阈值的确定依据。

1)超声波。根据文[12]、表 3,超声波值接近 8 dB,但稳定在 8 dB 附近,认为劣化程度为 4,超过 15 dB,认为劣化程度为 10,故将超声波值的上、下限分别定位 8、15 dB。

2)TEV 值。根据文[12]表 3,TEV 数值接近 20 dB,但是稳定在 20 dB 附近,认为劣化程度为 4,相对值大于 34 dB,认为劣化程度为 10。故将 TEV 值的上、下限分别定位 20、34 dB。

3)绝缘电阻。根据文[3]表 A.10,开关柜本体的绝缘电阻标准为:20℃时,不低于 300 MΩ,评分标准为:绝缘电阻折算到 20℃下,低于 500 MΩ,扣 10 分;低于 400 MΩ,扣 20 分;低于 300 MΩ,扣 40 分。故将绝缘电阻的上、下限分别定位 300、500 MΩ。

4)真空度。《高压断路器订货技术条件》中规定:对于运行中的真空断路器,规定其真空灭弧室的真空压力不能大于 6.6×10^{-2} Pa,电力部颁布的标准规定真空度压力不能大于 3.3×10^{-2} Pa,文[13]指出,当断路器真空灭弧室的真空度在 $1.33\times 10^{-5}\sim 1.33\times 10^{-2}$ Pa 的范围内,认为开关柜处于高真空度,所以将真空度

的上下限定为 1.33×10^{-5} 、 1.33×10^{-2} Pa。

5)分、合闸时间。《10 kV 开关柜技术新要求》规定:断路器操作时间其合闸时间小于 65 ms;分闸时间小于 50 ms。

6)红外温度值。文[21]中规定电缆/母线连接处温度不能超过 60℃,并认为此温度小于 50℃时,为优等级,故将红外温度值的上、下限阈值分别定为 50、60℃。

7)负荷率。根据文[22]中表 4-6,当负荷率小于等于 40%时,完全属于 A 等级;当负荷率大于等于 120%时,完全属于 E 等级,故将负荷率的上、下限分别定为 40%和 120%。

8)环境湿度。根据现场调研结果,随着环境湿度的增大,开关柜的局部放电量会明显增加,文[22]表 4-5 表示,当环境湿度小于 35%时,不会对开关柜造成影响,当环境湿度大于 85%时,就该引起注意,当环境湿度大于 100%时,按照异常状态进行处理,综上,文中将环境湿度的上、下分别定为 35%和 90%。

对于开关柜的运行年限信息和开关柜在电网中的位置信息,采用比例模进行评价。总结出各状态量的评价模型及相应阈值见表 3-8。

表 3 断路器状态量评分阈值及其评价模型

Table 3 Circuit breaker condition assessment items thresholds and their assessment models

评价项目	a	b	评价模型
超声波	8 dB	15 dB	降半岭模型
TEV 值	20 dB	34 dB	降半岭模型
真空度	1.33×10^{-5} Pa	1.33×10^{-2} Pa	降半岭模型
分闸时间	20 ms	50 ms	降半岭模型
合闸时间	35 ms	60 ms	降半岭模型

表 4 母线状态量评价阈值及其评价模型

Table 4 Buses condition assessment items thresholds and their assessment models

评价项目	a	b	评价模型
红外温度	50℃	60℃	降半岭模型
超声波	8 dB	15 dB	降半岭模型
TEV 值	20 dB	34 dB	降半岭模型
绝缘电阻	300 MΩ	500 MΩ	升半岭模型

表 5 出线电缆状态量评价阈值及其评价模型

Table 5 Cable outlets condition assessment items thresholds and their assessment models

评价项目	a	b	评价模型
红外温度	50℃	60℃	降半岭模型
超声波	8 dB	15 dB	降半岭模型
TEV 值	20 dB	34 dB	降半岭模型

表 6 环境信息评价阈值及其评价模型

Table 6 Environment information condition assessment items thresholds and their assessment models

评价项目	a	b	评价模型
环境湿度	35%	90%	降半岭模型

表 7 运行信息评价阈值及其评价模型

Table 7 Operation information condition assessment items thresholds and their assessment models

评价项目	a	b	评价模型
负荷率	40%	120%	降半岭模型
运行年限	—	—	比例模型 *

*: 对于运行年限的融合, 采用乘以系数 K_T 的方法, 计算公式^[4]: $K_T = (100 - \text{运行年数} \times 0.3) / 100$ 。

表 8 位置信息评价模型

Table 8 Location information condition assessment model

评价项目	评价模型	比例系数
负荷	能转移	比例模型 $K_0=1.00$
转移能力	不能转移	比例模型 $K_0=0.95$

在得到各个状态量的评价分值后, 为了方便后续数据融合过程的进行, 对评分值进行归一化处理, 将结果统一除以 100, 变换到 [0, 1] 区间内。

2.2 分层评价模型

真空开关柜的分层评价模型见图 1。在图 1 中, 每个父层的状态评价结果由其子层决定, 并借鉴文 [3] 中的评分方法: 当各子层的状态得分值均大于 0.7 时, 父层的状态评价得分值取所有子层状态得分值的平均值; 否则, 取子层状态得分值中的最小值作为父层的状态评价得分值。将得分值代入每个状态等级的隶属度函数, 根据最大隶属度原则, 确定设备的状态等级, 隶属度函数采用常见的三角形模型和半梯型模型, 见表 9。

2.3 分层评估模型案例

以北京某变电站的某 10 kV 真空开关柜为例, 从其运维检修记录中选取模型所需数据见表 10。已知该开关柜于 2005 年 6 月投运, 到现在运行 10 年, 根据表 7 注释计算出该开关柜的运行系数 $K_T = (100 - \text{运行年数} \times 0.3) / 100$; 开关柜位于配电网主干线路, 在故障时, 所带负荷可以得到有效转移, 故负荷转移系数 $K_0 = 1$; 根据式 (1)、(2) 及表 3-8 进行数据归一化处理, 得出每个状态量的评价结果见表 10 中“得分值”一列所示。

由表 10 可知, 断路器的 7 个子层状态量得分均大于 0.7, 故断路器的总得分为该 7 个值的算术平均值, 即 0.97, 对应的隶属度矩阵为 [0.8, 0.2, 0, 0, 0], 根据最大隶属度原则, 断路器的状态等级为 A。同理,

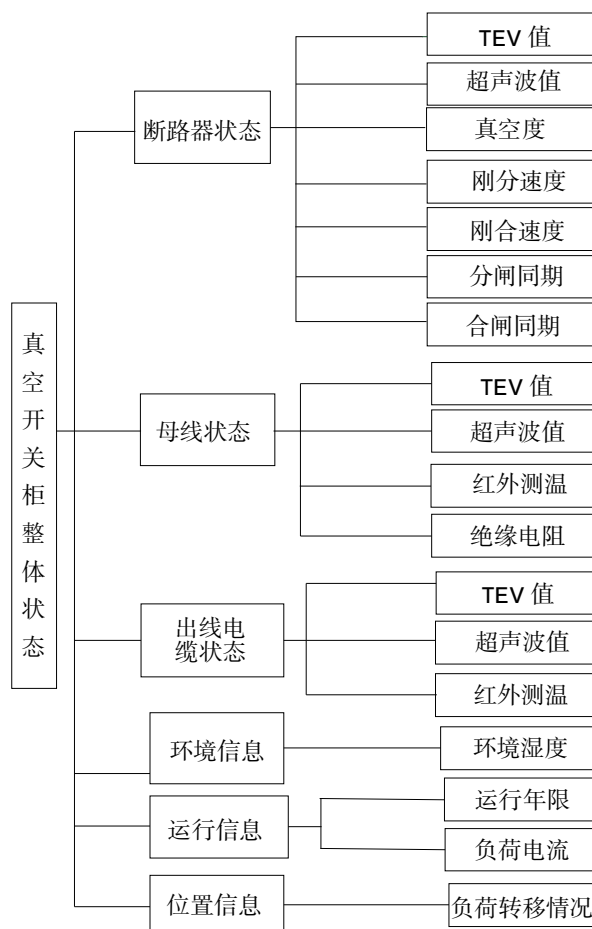


图 1 10 kV 真空开关柜分层状态评价模型

Fig. 1 A layer condition assessment model of 10 kV vacuum switch cabinet

表 9 隶属度函数模型表

Table 9 Membership function models

状态等级	隶属度函数模型
A	$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.85 \\ \frac{20x-17}{3} & 0.85 \leq x < 1 \\ 1 & x \geq 1 \end{cases}$
B	$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.6 \\ 4x-2.4 & 0.6 \leq x < 0.85 \\ \frac{20-20x}{3} & 0.85 \leq x < 1 \\ 0 & x \geq 1 \end{cases}$
C	$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.4 \\ 5x-2 & 0.4 \leq x < 0.6 \\ -4x+3.4 & 0.6 \leq x < 0.85 \\ 0 & x \geq 0.85 \end{cases}$
D	$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.2 \\ 5x-1 & 0.2 \leq x < 0.4 \\ -5x+3 & 0.4 \leq x < 0.6 \\ 0 & x \geq 0.6 \end{cases}$
E	$f(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < 0.2 \\ -5x+2 & 0.2 \leq x < 0.4 \\ 0 & x \geq 0.4 \end{cases}$

表 10 10 kV 真空开关柜的试验数据及其得分值
Table 10 Experiment data and assessment marks of
10 kV vacuum switch cabinet

状态量信息	试验数据	得分值
断路器	超声波	7.00 dB
	TEV 值	15.00 dB
	真空度	1.20×10^{-5} Pa
	分闸时间	18.00 ms
	合闸时间	32.00 ms
母线	红外温度	52.00 °C
	超声波	7.00 dB
	TEV 值	15.00 dB
	绝缘电阻	560.00 MΩ
出线电缆	红外温度	54.00 °C
	超声波	7.00 dB
	TEV 值	15.00 dB
环境信息	环境湿度	72.00%
运行信息	运行年限	10.00 a
	负荷率	27.00%
位置信息	能否及时转移负荷	能
		$K_T=0.97$
		$K_D=1.00$

可以得出开关柜其他部分的隶属度矩阵与状态等级,见表 11。

表 11 各部分的得分值及各状态等级隶属度
Table 11 Evaluation scores and memberships of
different grades

评价部分	得分值	各状态等级的隶属度函数				
		A	B	C	D	E
断路器	0.97	0.80	0.20	0.00	0.00	0.00
母线	0.95	0.67	0.33	0.00	0.00	0.00
出线电缆	0.70	0.00	0.40	0.60	0.00	0.00
环境信息	0.80	0.00	0.80	0.20	0.00	0.00
负荷率	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

根据表 11 可知,各部分中得分最低为 0.7,再将此结果依次乘以系数 K_T 与 K_D ,即开关柜的综合评分值为: $K_T K_D \times 0.7 = 0.97 \times 1 \times 0.7 = 0.68$ 。将该结果代入表 9,得出开关柜整体的状态评价等级的隶属度矩阵为 $[0, 0.32, 0.68, 0, 0]$,根据最大隶属度原则,该开关柜的状态等级为 C。

3 基于贝叶斯网络的 10 kV 真空开关柜动态状态评价模型

贝叶斯网络是一种有向无环图,见图 2。由代表

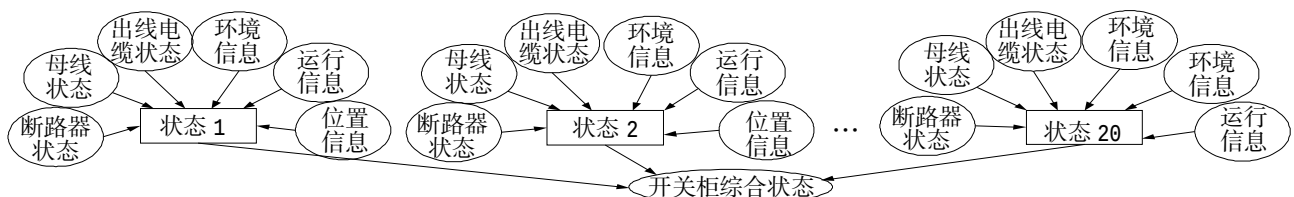


图 3 10 kV 真空开关柜贝叶斯网络状态评价模型

Fig. 3 Condition assessment model of 10 kV vacuum switch cabinet based on Bayes network

变量的节点及连接这些节点的有向边构成,边的方向由父节点指向子节点。令网络中的任意一个节点与其余每个节点相关的条件概率为 P ,图 2 中, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 有式(3)所示的关系

$$P(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = P(X_1 | X_2, X_5) P(X_3 | X_5) P(X_4 | X_3, X_5) P(X_5) \quad (3)$$

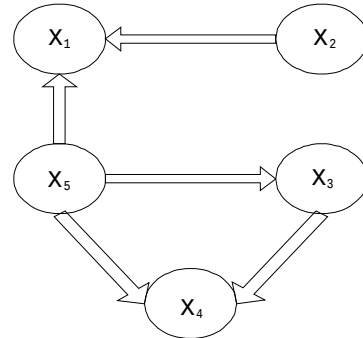


图 2 一个简单的贝叶斯网络

Fig. 2 A simple Bayes network

贝叶斯网络法在不确定性知识表达与推理领域具有很高的权威性,该模型能发现大量变量之间的关系,是进行预测分类的有效工具,同时也是决策层融合技术常见的算法模型^[23]。

为了对开关柜的未来状态进行预测,需要以其历史状态为依据。一般国内供电公司对于 10 kV 开关柜进行例行巡检的频率为每年 4 次,考虑距离当前最近的 20 次例行巡检,应用 2.2 节中提出的分层状态评价方法,对这 20 组带电检测数据、停电检修数据、环境信息以及运行信息等数据进行融合,得出开关柜在过去 20 个不同时段内的状态,并分别记为状态 1、状态 2、…、状态 20。应用贝叶斯网络融合这 20 个阶段的状态评价结果,对开关柜状态进行动态地评价,得出该设备未来处于各状态等级的概率。开关柜的贝叶斯网络状态评价模型见图 3。

贝叶斯网络条件概率的数学公式为

$$P_i = \frac{\partial_k + N_k}{\sum_{n=1}^r (\partial_k + N_k)} \quad (4)$$

式(4)中: N_k 指状态为 k 的样本数; r 为总状态数目; ∂_k 为专家知识,由领域内专家给定,也可以采用假设情况,即认为变量取每个值的概率均相等,即:

$\partial_k=1, \partial=\sum_{k=1}^r \partial_k$ (文中采用这种定义),那么式(4)简化为

$$P_i = \frac{1+N_k}{\sum_{n=1}^r (1+N_k)} \quad (5)$$

下面通过一个例子说明该模型的使用方法。

文中有 A、B、C、D、E 5 个等级的状态,所以 r 为 5, k 分别代表了 A、B、C、D、E 5 种状态。统计出一个 10 kV 开关柜的 20 个状态分别为 A、B、C、D、E 的次数为 17、2、1、0、0,根据式(5)计算该开关柜综合状态分别为 A、B、C、D、E 的概率为:

$$P(A) = \frac{1+17}{(1+17)+(1+2)+(1+1)+(1+0)+(1+0)} = 0.72;$$

$$P(B) = \frac{1+2}{(1+17)+(1+2)+(1+1)+(1+0)+(1+0)} = 0.12;$$

$$P(C) = \frac{1+1}{(1+17)+(1+2)+(1+1)+(1+0)+(1+0)} = 0.08;$$

$$P(D) = \frac{1+0}{(1+17)+(1+2)+(1+1)+(1+0)+(1+0)} = 0.04;$$

$$P(E) = \frac{1+0}{(1+17)+(1+2)+(1+1)+(1+0)+(1+0)} = 0.04。$$

可见,该开关柜未来处于 A 级状态的概率最大,并与开关柜实际运行结果比较,结果相符,证明了该方法的有效性。与现有的开关柜状态评价方法相比,该方法简单有效,评价结果准确,并且实现了开关柜未来状态的预测。

对比常规概率算法,得到开关柜分别处于 A、B、C、D、E 等级的状态的概率为

$$P(A) = \frac{17}{17+2+1+0+0} = 0.81;$$

$$P(B) = \frac{2}{17+2+1+0+0} = 0.10;$$

$$P(C) = \frac{1}{17+2+1+0+0} = 0.05;$$

$$P(D) = \frac{0}{17+2+1+0+0} = 0.00;$$

$$P(E) = \frac{0}{17+2+1+0+0} = 0.00。$$

观察计算结果,由于在过去 5 年内,开关柜状态一直没有处于 D 级和 E 级的记录,故认为开关柜状态在未来也没有可能处于这两个等级,而考虑到电力设备故障的发生是有一定随机性,并且随着运行时间的增加,设备进一步老化,有一定可能性处于 D 级和 E 级状态,故采用常规概率的计算方法有一定的局限性,只能进行统计而无法进行预测。而采用式(4)的概率计算方法,可以较好地解决该问题,使预测结果更加符合电力设备的实际运行情况。

4 结语

针对当前配电开关柜状态评价研究的不足之处,文中提出了一种基于贝叶斯网络的配电真空开关柜状态评价方法,将真空开关柜分成断路器、母线、出线电缆 3 部分,通过分析其超声波检测值、TEV 检测值、红外测温结果、真空度、机械性能参数等信息,并融合开关柜运行的环境信息、运行信息以及其在电网中的位置信息,建立开关柜分层状态评价模型,根据最大隶属度原则,确定开关柜的状态等级,并根据有关历史检修信息,计算出过去 5 年内 20 个时段的状态等级,将统计结果应用于贝叶斯条件概率模型,最终得出该开关柜未来状态处于各等级的概率。

该模型不仅考虑了设备的在线监测、带电检测等信息,同时融合了开关柜的环境信息、运行信息以及电网位置信息,使状态评价结果更加精确;而且通过开关柜在过去不同时段内的状态评价结果,对未来所处状态进行预测,是一种动态评价模型,为后续的检修工作提供了更加可靠的依据,提高了设备的可靠性和利用率。

参考文献:

- [1] 黄新波,赵阳,廖志军,等.基于物联网的高压开关柜综合在线监测装置设计[J].高压电器,2015,51(5):1-7.
HUANG Xinbo,ZHAO Yang,LIAO Zhijun,et al. Design of comprehensive on-line monitoring device for high voltage switchgear based on internet of things[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5):1-7.
- [2] 张青山,段建东,叶兵,等.基于 ZigBee 的开关柜触头温度在线监测预警系统[J].高压电器,2015,51(4):29-36.
ZHANG Qingshan,DUAN Jiandong,YE Bing,et al. On-line temperature monitoring/warning system based on Zig-Bee for switchgear contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4):29-36.
- [3] Q/GDW 645—2011 配网设备状态评价导则[S].北京:国家电网公司,2011.
Q/GDW 645—2011 Guidelines of condition assessment for electric distribution network equipments[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2011.
- [4] 徐建源,张彬,林莘,等.能谱熵向量法及粒子群优化的 RBF 神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J].高电压技术,2012,38(6):1299-1306
XU Jianyuan,ZHANG Bin,LIN Xin,et al. Application of energy spectrum entropy vector method and RBF neural networks optimized by the particle swarm in high-voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6):1299-1306.
- [5] 付强,陈特放,朱佼佼.采用自组织 RBF 网络算法的变压器故障诊断[J].高电压技术,2012,38(6):1368-1375.

- FU Qiang, CHEN Tefang, ZHU Jiaojiao. Transformer fault diagnosis using self-adaptive RBF neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6):1368-1375.
- [6] LI Xin, QI Hongwei, TENG Yun, et al. Evaluation method of high voltage circuit breaker running state based on matter element theory and AHP[C]//International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE). [S.l.]: IEEE, 2010:7-9.
- [7] 李海英, 冯冬, 宋建成. 中压真空断路器的模糊-证据理论在线状态评估模型[J]. 高压电器, 2013, 49(1):40-45.
- LI Haiying, FENG Dong, SONG Jiancheng. Fuzzy-DS evidence theory online assessment model of MV vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1):40-45.
- [8] 廖瑞金, 王谦, 洛思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评价模型[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.
- [9] 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.
- [10] 郭新辰, 宋琼, 樊秀玲. 基于半监督分类方法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2013, 39(5):1096-1100.
- GUO Xincheng, SONG Qiong, FAN Xiuling. Transformer fault diagnosis based on semi-supervised classifying method[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5):1096-1100.
- [11] NATTI S, KEZUNOVIC M. Assessing circuit breaker performance using condition-based data and Bayesian approach[J]. Electric Power Systems Research, 2011(81):1796-1804.
- [12] 李刚, 朱革兰. 配电开关柜状态检测与评价实施方式的探讨[J]. 高电压技术, 2013, 49(8):133-138.
- LI Gang, ZHU Gelan. Study on the Implementation of switchgear status detection and evaluation for distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8):133-138.
- [13] 王丹丹. 室内 10 kV 真空开关柜安全运行状态评估策略的研究[D]. 郑州: 河南理工大学, 2011.
- WANG Dandan. Research of evaluation strategy for safe operation state of indoor 10 kV vacuum switch cabinet[D]. Zhengzhou: Henan Polytechnic University, 2011.
- [14] 谢静, 束洪春, 王科, 等. 基于突变级数法的高压开关柜状态评价[J]. 高电压技术, 2014, 40(8):2372-2380.
- XIE Jing, SHU Hongchun, WANG Ke, et al. State evaluation algorithm based on catastrophe progression method of high voltage switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8):2372-2380.
- [15] 谢静, 束洪春, 王科, 等. 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):3186-3192.
- XIE Jing, SHU Hongchun, WANG Ke, et al. State evaluation based on AHP fuzzy theory of high voltage switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10):3186-3192.
- [16] 杨露菁, 余华. 多源信息融合理论与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011.
- YANG Lujing, YU Hua. Theory and application of multi-source information fusion[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2011.
- [17] BAHADOR K, KHAMIS A, FAKHREDDINE O K, et al. Multisensor data fusion[J]. A Review of the State-of-the-art. Information Fusion, 2013, 14(1):28-44.
- [18] 国家电网公司运维检修部. 电网设备状态检测技术应用典型案例(2011—2013年)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- Operation and Maintenance Department of State Grid. Typical application cases of condition detection technology for power equipment(2011-2013)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [19] 栗然, 王飞飞, 李增辉. 基于风险评估的配电网检修决策优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11):1-8.
- LI Ran, WANG Feifei, LI Zenghui. Maintenance decision making optimization based on risk assessment for distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):1-8.
- [20] 张哲, 赵文清, 朱永利, 等. 基于支持向量回归的电力变压器状态评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4):81-84.
- ZHANG Zhe, ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, et al. Power transformer condition evaluation based on support vector regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4):81-84.
- [21] DL/T 664—2008 带电设备红外诊断应用规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2008.
- DL/T 664—2008 Application rules infrared diagnosis live-electrical equipment[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2011.
- [22] 徐先新. 基于模糊分层理论的开关柜状态评估方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- XU Xianxin. Study of the condition assessment method for switchgear with hierarchical fuzzy theory[D]. Beijing: North China Electric University, 2014.
- [23] 赵文清, 朱永利, 姜波, 等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. 高电压技术, 2008, 34(5):1036-1037.
- ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by bayes networks[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5):1036-1037.
- 亢超群(1991—), 女, 助理工程师, 研究方向为配电设备状态评价及状态检修。
- 李二霞(1984—), 女, 工程师, 研究方向为状态检修、配电自动化。
- 盛万兴(1965—), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电网规划、计算机控制、人工智能、电力系统节能技术、智能电网技术及电网经济运行等研究工作。
- 张建华(1952—), 男, 教授, 博士生导师, IET 会士, 主要研究方向为配电网规划、电力系统安全应急等。
- 常方圆(1989—), 女, 助理工程师, 研究方向为状态检修、配电自动化。
- 程序(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力设备状态检测及故障诊断分析工作。