DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.036

基于模糊层次的电能计量装置运行状态自动评估方法

陈长基[1],吴达雷[2],陈龙瑾[2],吴清耀[2]
(1. 海南电网有限责任公司 五指山供电局,海南 五指山 572299;
2. 海南电网有限责任公司 电能计量中心,海南 海口 570105)

摘　要:为准确判断电能计量装置运行状态,提出基于模糊层次分析的电能计量装置运行状态自动评估方法。利用 DEMATEL 法选择电能计量装置运行状态自动评估指标并采集指标对应的数据。计算指标权重并利用模糊综合评价法计算得到评估值,按照最大隶属度原则,得出运行状态等级。结果表明:1 号和 4 号电能计量装置处于正常状态;2 号和 3 号电能计量装置处于注意状态,说明这两个装置出现了一些故障征兆;5 号电能计量装置处于异常状态,这一状态的电能计量装置已经无法正常工作,需要进行维护。测试结果证明了所提方法的有效性。

关键词:电能计量装置;模糊层次分析;运行状态;指标选取;权重计算;DEMATEL 法
中图分类号:TP271　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2024)06-0180-05

Automatic Evaluation Method for Operating Status of Electric Energy Metering Devices Based on Fuzzy Hierarchy

CHEN Changji[1], WU Dalei[2], CHEN Longjin [2], WU Qingyao[2]
(1. Wuzhi Mountain Power Supply Bureau, Hainan Power Grid Co., Ltd., Wuzhishan 572299, China;
2. Power Metering Center, Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570105, China)

Abstract: To accurately determine the operating status of electric energy metering devices, a fuzzy analytic hierarchy process based automatic evaluation method for the operating status of electric energy metering devices is proposed. The DEMATEL method is applied to select automatic evaluation indicators for the operation status of electric energy metering devices and collect data corresponding to the indicators. The weight of the indicators is calculated and the evaluation value is gained by fuzzy comprehensive evaluation method. According to the principle of maximum membership, the operating status level is obtained. The results indicate that the electric energy metering devices No.1 and No.4 are in normal condition, and the No.2 and No.3 electric energy metering devices are in a state of attention, indicating that these two devices have some signs of failure, while the No.5 electric energy metering device is in an abnormal state, in which the electric energy metering device no longer functions properly and requires maintenance. Test results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: electric energy metering device; fuzzy analytic hierarchy process; operation status; index selection; weight calculation; DEMATEL method

0　引言

电网公司运行的电能计量装置[1]点多且面广,工作人员无法快速寻找到故障表,工作效率不高。当出现故障时,主要靠人工方式现场开展检查、检验以及安全管控,容易出现管理不到位而造成计量装置资产损坏或者计量装置计量失准情况[2]。面对上述情况,为了能够保证电能计量装置的计量准确性,定期了解装置的运行状态是十分必要的[3]。

李若茜等[4]在其研究中通过 Bootstrap 方法得到先验信息,然后以此为基础,结合电能表寿命数据,在贝叶斯网络的应用下计算出参数估计值,完成智能电表可靠性评估。程瑛颖等[5]在其研究中采集了电能表运行时序数据并实施了预处理,结合随机矩阵理论,基于处理好的数据计算时序曲线特征,再以特征利用动态时间规整聚类算法来完成电能表运行状态评估。高书垚等[6]利用正态云模型确定了评估指标,用熵权法计算了指标权重,再结合隶属度矩阵建立评估模型并按照隶属度最大原则得出电能表状态类型,完成运行状态评估。虽然前人取得了研究成果,但是在数据采集环节中采用人工录入系统的方式,容易存在弄虚

基金项目:海南电网有限责任公司自筹项目(070000KK52200017)
第一作者简介:陈长基(1979—),男,海南海口人,工程师,研究生,研究方向为电能计量、电力市场营销,chenchangji711@163.com。

作假的情况,造成计量装置评估工作难以有效、公平地执行。

本文研究一种基于模糊层次分析的电能计量装置运行状态评估方法,以期为电力公司运维管理工作提供可靠的参考。

1　电能计量装置运行状态研究

电能计量装置的健康状况直接关系到电力公司的电费收取。电能计量装置运行时受到各种因素的影响,运行状态极易从正常状态转换为故障状态,一旦发生故障,计量数据就会不准确[7]。面对这种情况,了解电能计量装置运行状态,进行有效的电能表运维管理是目前电网计量专业急需解决的重要问题[8]。为此,结合模糊层次分析法建立评估模型。

1.1　电能计量装置运行状态描述指标选取与采集

1)指标选取

要想直接了解电能计量装置运行状态是无法实现的,只能通过能够描述其状态的相关指标间接获得,因为运行状态会通过这些指标表征出来[9]。为此,在评估中的指标选取工作是第一步。一般情况下,电能计量装置运行状态描述指标会有多个,但并不是每一个指标都可以用于状态评估中的,其中部分指标不需要考虑在内[10]。为此,需要进行指标选取。这里采用 DEMATEL 法进行指标选取,具体过程如下。

步骤 1:基于指标选取原则确定候选指标,为后续精确选择提供初始参考指标,记为 $A=\{a_i \mid i=1,2,\cdots,N\}$。其中,$a_i$ 代表第 i 个电能计量装置运行状态描述指标;N 表示初始指标数量。

步骤 2:组建专家组,利用其专业知识和技能,分析 $A=\{a_i \mid i=1,2,\cdots,N\}$ 中各个指标之间的影响关系。

步骤 3:根据影响关系,建立关联关系有向图。指标之间存在直接影响关系,且是前者对后者产生影响,因此是 $a_i \rightarrow a_j$。

步骤 4:影响程度计算,量化标准如表 1 所示。

表 1　影响程度量化标准表

$a_i \rightarrow a_j$ 影响程度	量化值
强	3
中	2
弱	1

专家组参考表 1 对各个指标间的影响程度进行量化,得出具体影响数值,记为 $b(a_i \rightarrow a_j)$。

步骤 5:根据量化出来的影响程度数值 $b(a_i \rightarrow a_j)$ 建立影响集合,记为 $B=\{b(a_i \rightarrow a_j)\}_{NN}$。

步骤 6:规范化 $B=\{b(a_i \rightarrow a_j)\}_{NN}$,得到 $\tilde{B}=\{\tilde{b}(a_i \rightarrow a_j)\}_{NN}$。

步骤 7:根据 $\tilde{B}=\{\tilde{b}(a_i \rightarrow a_j)\}_{NN}$ 计算综合影响集合 D 如下:

$$D=\tilde{B}\left(\frac{I-\tilde{B}^{N-1}}{I-\tilde{B}}\right)=\left[d(a_i \rightarrow a_j)\right]_{NN} \tag{1}$$

式中 I 为单位函数。

步骤 8:对 D 按行相加得到指标的影响度,记为 d_i。

步骤 9:对 D 按列相加得到指标的被影响度,记为 e_i。

步骤 10:将 d_i 和 e_i 相加,得到评价指标的中心度 $C_{s,i}$;

步骤 11:将 d_i 和 e_i 相减,得到评价指标的原因度。

步骤 12:设置中心度和原因度阈值,将在阈值之内的指标作为评估指标[11]。

2)指标数据采集

基于上述过程选出评估指标,采集对应的指标数据作为评估分析的基础数据。在这里需要借助电力物联网和大数据技术建立传输网络,全面支撑终端设备/网关接入统一物联网平台,然后将采集到的数据上送至物联网平台,通过物联网平台再将数据转发至计量装置数字化管理系统主站,为状态评定实现提供数据支撑。指标数据采集框架如图 1 所示[12]。

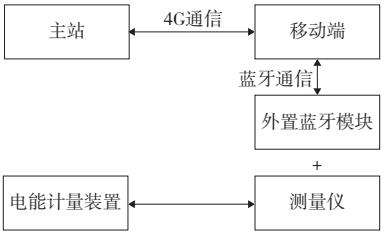

图 1　指标数据采集框架

采集到的指标数据以文件的方式进行传输。数据文件传输过程中,在接收到“数据传输”指令后,将实时数据打包成 TXT 文件,并将其上传到远程数字化管理系统主站,数字化管理系统主站读取相应文件并解析出数据,进行进一步的评估分析。

1.2　电能计量装置运行状态模糊层次评估实现

基于上述选择的评估指标以及采集到的指标数据,本节进行电能计量装置运行状态模糊层次评估。该评估主要分为两部分,即计算权重和计算评估值。层次分析法与模糊综合评价法结合在一起统称为模糊层次分析。

1)层次分析法确定指标权重

权重是反映指标重要程度的一种直观量化值。通过层次分析法的指标间对比,得出权重。计算过程如下。

步骤 1:将评估指标进行分类和归纳,建立电能计量装置运行状态描述指标评估体系。

步骤 2:按照公式对指标进行归一化处理。处理公式如下:

$$\hat{r}_i=\frac{r_i-r_{\min}}{r_{\max}-r_{\min}} \tag{2}$$

式中:$\hat{r}_i$ 为归一化处理后的指标;r_i 为原始指标;$r_{\max}$、$r_{\min}$分别为指标的最大值和最小值。

步骤 3:按照表 2 指标相对重要性量化标准表,对指标相对重要程度进行打分,记为 h_{ij}。

表 2　指标相对重要性量化标准表

量化值	相对重要性含义
1	一个指标与另一个指标同等重要
3	一个指标比另一个指标稍微重要
5	一个指标比另一个指标明显重要
7	一个指标比另一个指标强烈重要
9	一个指标比另一个指标极端重要
2/4/6/8	以上相邻判断的中间值
倒数	一个指标与另一个指标 之间的相对重要程度相反

步骤 4:根据 h_{ij}建立判断矩阵 $\boldsymbol{H}$。

$$\boldsymbol{H}=[h_{ij}]_{nn}=\begin{bmatrix}h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n}\\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ h_{n1} & h_{n2} & \cdots & h_{nn}\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中 n 为上一节选出的评估指标数量。

步骤 5:通过计算随机一致性比值判断矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的局部一致性检验。计算公式如下:

$$C_{\mathrm{R}}=\frac{C_{\mathrm{I}}}{T} \tag{4}$$

$$C_{\mathrm{I}}=\frac{R_{\max}-n}{n} \tag{5}$$

式中:C_{R} 代表随机一致性比值,<1.0 时通过检验;$R_{\max}$为判断矩阵最大特征值;C_{I} 为一致性指标;T 为平均随机一致性指标。

步骤 6:按照上述步骤进行总体一致性检验。

步骤 7:计算指标权重。具体过程如下。

a)求取各行指标的总和,计算公式如下:

$$L_k=\sum_{k=1}^{n}h_{ij} \tag{6}$$

式中:L_k 为第 k 行指标的总和;h_{kj}为第 k 行第 j 个指标。

b)L_k 正规化计算,计算出来的数值就是权重,公式如下:

$$v_j=\frac{h_{kj}}{L_k} \tag{7}$$

式中 v_j 为第 j 个指标的权重。

2)模糊综合评价

基于上述研究成果,利用模糊综合评价法计算评估值,得出电能计量装置运行状态等级。具体过程如下。

步骤 1:建立评估因素集,即 $r=\{r_1,r_2,\cdots,r_M\}$,$r_i=\{r_{i1},r_{i2},\cdots,r_{im}\}$;$M$ 代表属性类型,也就是上述层次分析中评估体系中的准则层数量;m 代表属性类型对应下的评估因素数量。

步骤 2:建立评语集。在这里电能计量装置运行状态分为 5 个等级,由此建立评语集 U 如下:

$$U=\{u_1,u_2,u_3,u_4\} \tag{8}$$

式中 u_1、u_2、u_3、u_4 分别为严重、异常、注意和正常状态。

步骤 3:确定模糊关系矩阵,也就是确定评价指标之于评语集 U 的隶属程度,由此可以建立评价模糊集合,记为$\{g_{j1},g_{j2},g_{j3},g_{j4}\}$,分别代表第 j 个评价指标对 4 个评语的隶属程度。

步骤 4:计算所有指标的之于 4 个评语的隶属程度,由此建立一个 4 行 n 列的矩阵,记为 $\boldsymbol{G}$。

步骤 5:计算模糊综合评估值。计算公式如下:

$$Y=V\cdot\boldsymbol{G}=\{y_1,y_2,y_3,y_4\} \tag{9}$$

式中:Y 为模糊综合评估集合;y_1,y_2,y_3,y_4 为模糊综合评估值。

参照隶属度最大原则,在$\{y_1,y_2,y_3,y_4\}$中找到最大值,该值对应的评语就是电能计量装置运行状态情况。

2　算例分析

为测试所设计评估方法在实际电能计量装置运行状态评估中的应用效果,选取 5 个电能计量

装置作为对象,评估其状态。

2.1　评估指标体系

通过计算指标的中心度和原因度,选出电能计量装置的状态评估指标,然后进行分类和归纳。电能计量装置运行状态评估指标体系如表 3 所示。

表 3　电能计量装置运行状态评估指标体系

目标层	准则层	方案层	中心度	原因度
电能计量装置运行状态	性能指标	周检实测值	1.531	0.895
		运行电压	1.895	0.896
		负荷电流	1.984	1.654
		功率因数	1.245	1.045
		运行寿命	1.345	0.956
	可靠性指标	历史故障	1.985	0.842
		历史误差	1.740	1.321
		家族缺陷	1.236	1.056
	运行环境指标	环境湿度	1.846	1.540
		环境温度	1.623	1.074
		电磁场干扰强度	1.896	1.422
		频率波动	1.231	1.125

注:中心度≥1,原因度≥0.8 选为评估指标。

根据所选择的指标,采集一段时间内对应的指标数据。

2.2　指标权重计算结果

利用 1.2 节 1) 计算指标权重,准则层指标权重计算结果如图 2 所示,方案层指标权重计算结果如表 4 所示。

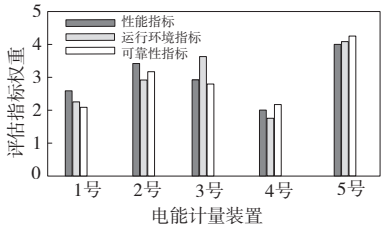

图 2　准则层指标权重计算结果

表 4　方案层指标权重计算结果

方案层	电能计量装置				
	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
周检实测值	2.556	3.985	2.987	3.654	2.988
运行电压	1.865	4.854	3.987	3.042	5.567
负荷电流	2.840	2.565	4.452	2.850	5.634

续表4

方案层	电能计量装置				
	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
功率因数	1.846	1.500	1.852	1.422	4.566
运行寿命	0.846	0.844	6.562	2.844	2.435
历史故障	1.865	2.854	5.645	3.147	3.465
历史误差	1.222	1.865	1.982	2.310	1.655
家族缺陷	1.211	0.854	0.622	2.242	2.645
环境湿度	0.885	0.189	0.452	0.632	1.510
环境温度	0.865	0.385	0.740	0.417	1.065
电磁场干扰强度	1.654	1.800	0.685	0.362	1.628
频率波动	1.986	1.985	1.546	2.213	2.853

2.3　评估结果

利用模糊综合评价法计算评估值,明确电能计量装置运行状态。电能计量装置运行状态评估结果如图 3 所示。

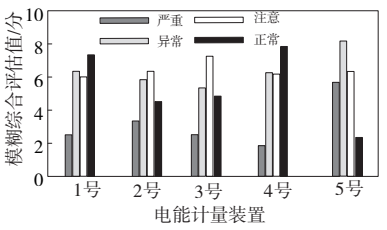

图 3　电能计量装置运行状态评估结果

根据其评分值,结合隶属度最大原则:1 号和 4 号电能计量装置处于正常状态,说明这两个装置运行良好,没有出现任何故障问题;其次是 2 号和 3 号电能计量装置处于注意状态,说明这两个装置出现一些故障征兆,对整体运行影响并不大,电能计量装置仍然可以保持正常工作,但是若任其发展下去,故障问题会恶化,最终出现异常;最后是 5 号电能计量装置处于异常状态,这一状态的电能计量装置已经无法正常工作,记录下的电表数据已经存在误差,需要进行维护;不存在严重等级状态的装置。

3　结语

实现电能计量装置的有效运维管理是电力公司关注的重点。其中电能计量装置状态分析和监测最为重要,一旦该装置出现故障,记录的用电数据就会存在较大误差。针对这一点,本文进行基

于模糊层次分析的电能计量装置运行状态评估研究。该研究通过指标权重与模糊关系矩阵的计算获得评估值,由此对应得到状态等级。最后选取5个电能计量装置作为测试用例,对评估方法进行应用测试,通过测试过程,证明了评估方法的有效性。

参考文献:

[1] 陈崇明,吴瀛,姚栋方,等. 一种电能计量装置状态在线监测及远程诊断系统设计[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(4):203-208.

[2] 于海波,王春雨,袁晓蕾,等. 基于PCA-SVR的电能计量装置误差评估算法[J]. 电测与仪表,2020,57(19):140-145.

[3] 许丹,李游,李贺龙. 基于联合分布适配的智能电表运行状态评价[J]. 北京航空航天大学学报,2022,48(4):674-681.

[4] 李若茜,肖霞,梅能,等. 基于Bayes和Bootstrap方法的智能电表可靠性评估[J]. 南方电网技术,2022,16(3):76-81.

[5] 程瑛颖,杜杰,周全,等. 基于随机矩阵理论和聚类算法的电能表运行状态评估方法[J]. 中国电力,2020,53(11):116-125.

[6] 高书垚,安泰,宋剑. 基于熵权-正态云模型的智能电能表状态评估研究[J]. 电测与仪表,2022,59(1):190-194.

[7] 蔡慧,乔适苏,袁健,等. 基于信息融合的低压智能电能表动态评价模型[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):206-214.

[8] 朱少斌,许素安,马宗彪,等. 基于BSO-BPNN模型的电能计量装置异常诊断方法研究[J]. 中国测试,2022,48(1):141-146.

[9] 刘文宇,刘璐,刘馨然,等. 基于改进BP神经网络的低压配电台区智能电能表误差状态评估模型[J]. 电测与仪表,2022,59(11):176-181.

[10] 路韬,黄友朋,党三磊,等. 基于改进ELM的计量终端定位算法仿真[J]. 计算机仿真,2022,39(9):377-383.

[11] 郭锞琛,吴宇列,张勇猛,等. 全角模式半球谐振陀螺阻尼误差补偿方法研究[J]. 自动化仪表,2021,42(5):6-9,13.

[12] 石宜金,谭贵生,赵波,等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(21):167-176.

收稿日期:2023-07-06

(上接第167页)

随着预紧力的增大而减小。由于微动幅值是影响早期疲劳裂纹形成的主要因素,因此,增大预紧力可以一定程度上起到延缓裂纹萌生并提高结构疲劳寿命的作用。

参考文献:

[1] GHORBANI H,CHAKHERLOU T N,TAGHIZADEH H. On the estimation of fatigue life in bolt clamped Al-alloy 2024-T3 plates[J]. Engineering Fracture Mechanics,2016,164:74-92.

[2] 刘宁,安鲁陵,王庆有,等. 拧紧策略及其对螺栓预紧力影响研究[J]. 装备制造技术,2022(10):26-29,33.

[3] 陈彦达,范振民,李军. 飞机螺栓双剪连接结构有限元应力分析[J]. 民用飞机设计与研究,2020(3):17-23.

[4] 肖睿恒,王耀,刘庆波,等. 预紧力对复合材料单搭接接头疲劳性能的影响[J]. 机械制造与自动化,2022,51(5):65-69.

[5] 郁大照,陈跃良,高永. 螺栓连接单搭接件疲劳特性试验与全寿命估算方法研究[J]. 中国机械工程,2013,24(20):2747-2752.

[6] 魏文杰,何晓聪,张先炼,等. DP780/AA6061薄板自冲铆接头微动损伤特性[J]. 机械工程学报,2020,56(6):169-175.

[7] 武洋洋,王莹. 螺栓连接件微动疲劳特性分析[J]. 力学季刊,2021,42(4):674-684.

[8] 梁尚清,苏爱民. 航空结构螺栓连接预紧力设计研究[J]. 航空科学技术,2014,25(9):24-27.

[9] 袁新璐,李根,张晓宇,等. 位移幅值对铜镁合金微动磨损行为的影响[J]. 摩擦学学报,2021,41(1):125-136.

[10] 刘宇,谯建春,李明生,等. 位移幅值对ZG230-450铸钢微动磨损行为的影响[J]. 机械工程材料,2021,45(7):46-50.

[11] 曾超,薛九天,田威,等. 铆接效应耦合的搭接接头受载应力与变形[J]. 科学技术与工程,2020,20(34):14295-14300.

[12] 高玉魁. 表面强化对A-100钢带孔构件疲劳性能的影响[J]. 材料热处理学报,2014,35(5):160-164.

收稿日期:2023-04-24