

DOI: 10.7667/PSPC171877

基于 CRITIC 和理想点法的计量设备运行质量评估

杨光盛¹, 崔幼¹, 宣玉华², 吕凡³, 刘晟源⁴, 林振智⁴

(1. 国网浙江省宁波供电公司, 浙江 宁波 315000; 2. 国网浙江省余姚供电公司, 浙江 宁波 315400; 3. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 4. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了定量评价电能计量设备的运行质量, 并提高电力用户用电计量的准确性和可靠性, 提出了一种联合采用 CRITIC 法和理想点法的计量设备运行质量评估方法。首先, 基于电力信息采集系统中的电能计量设备运行监测大数据, 定义了 5 个衡量电能计量设备质量的评估指标。然后, 采用基于熵权和斯皮尔曼等级相关系数的 CRITIC 法确定电能计量设备质量评估指标的客观权重, 并构建了基于理想点法的电能计量设备质量评估模型。最后, 以浙江省宁波市某地区的电能计量设备运行监测数据为例对所提出的模型和方法进行了验证。验证结果表明, 提出的方法不仅能够量化评价电能计量设备的运行质量, 而且能够合理地评估出电能计量设备的优劣。

关键词: 电能计量设备; 运行质量评估; 理想点法; 熵权; 斯皮尔曼等级相关系数

CRITIC and TOPSIS based operating quality evaluation of metering equipment

YANG Guangsheng¹, CUI You¹, XUAN Yuhua², LÜ Jifan³, LIU Shengyuan⁴, LIN Zhenzhi⁴

(1. State Grid Zhejiang Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China; 2. State Grid Zhejiang Yuyao Power Supply Company, Ningbo 315400, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 4. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to evaluate the operating quality of metering equipment quantitatively and improve the accuracy and reliability of the metering on power consumers, a method for evaluating the operating quality of metering equipment is presented by integrating the Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) method with the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) method. First, based on the metering data from the acquisition system for power consumers' information, five indexes for evaluating the quality of electricity energy metering equipment are defined. Then, the CRITIC method based on the entropy weight and Spearman rank correlation coefficient is presented for determining the objective weight of each index, and an evaluation model of the quality of metering equipment is built based on the TOPSIS method. Finally, the actual data measured for electricity energy metering equipment in regional Ningbo power grid of Zhejiang province is served for validating the proposed model and method. The simulation results show that the proposed method could quantify the operating quality of metering equipment and evaluate metering equipment reasonably.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901100), National Natural Science Foundation of China (No. 51377005) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LY17E070003).

Key words: electricity energy metering equipment; operating quality evaluation; TOPSIS; entropy weight; Spearman's rank correlation coefficient

0 引言

用电信息采集系统在电力交易结算、电量分析、

需求侧管理等业务应用中发挥着重要的技术支持作用^[1-3], 电能表、采集终端等电能计量设备作为用电信息采集系统的重要组成部分, 其质量直接影响用电信息采集系统的数据质量和应用水平, 以及该系统的安全、稳定和经济运行, 甚至也直接关系到供电的可靠性和电力用户用电计量的准确性^[4]。电能计量设备的质量评估是保证和提高电能计量设备质

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2016YFB0901100); 国家自然科学基金项目资助 (51377005); 浙江省自然科学基金项目资助 (LY17E070003)

量的重要手段之一, 是电能计量设备质量管理的关键环节。构建电能计量设备的质量评估模型对电能计量设备质量进行综合评价, 能为电网公司开展电能计量设备质量评估与监督提供客观和科学的依据, 对于智能电网的建设具有非常重要的实际意义和工程价值^[5]。文献[4]提出了采集终端运前质量、运行质量、维护质量评价指标, 基于熵权法和改进层次分析法构建了采集终端的全寿命周期质量评估模型与方法, 但是改进层次分析法需要引入专家主观的评价, 并且权重计算流程复杂。文献[5]提出了基于三角模糊层次分析法和缺陷扣分法的智能电能表全生命周期的质量评估层次模型与方法, 简化了文献[4]中权重计算的步骤, 实施更加容易, 但是其评价指标的取值是离散的, 故处在临界的电能设备评价结果会有较大误差。文献[6]提出了基于健康指数的电能计量装置运行评价方法, 但其判定阈值的选定主要依赖于专家经验。文献[7]研究了针对关口电表的状态评价指标和模型, 但其模型较为简单和粗糙, 并且缺少实例验证。文献[8]介绍了基于云平台的电能表可靠性预计系统技术架构和开发平台, 文献[9]提出了智能电表的正差率、负差率、零差率等质量评估指标, 构建了智能电表计量评价体系, 开发了智能电表计量实时监控平台, 但是文献[8-9]着重给出了实例分析的系统界面, 而对算法的阐述较为简略。文献[10]在文献[5]的基础上构建了智能电能表的全生命周期质量评价模型, 从供应商、不同型号、批次等角度探讨了智能电能表的质量评估, 但是没有给出相应的决策评估方法和算例分析。综上所述, 实际中电能计量设备的质量管理主要是以运前抽检和维护质量评估的手段为主; 而对电能计量设备的运行质量评估目前停留在运维人员或专家的主观评价上, 缺乏实际运行数据支撑。因此, 电能计量设备的质量评估指标体系不够全面, 评估模型与方法不够完善, 缺乏对电能计量设备质量做出科学、合理的定量评价, 未能较好地营销计量、物资管理提供科学合理的评价支持^[11]。然而, 随着电量采集技术的不断提高和智能电能表的大量应用, 对电能计量设备的运行监测和运行数据采集已经实现^[7]。此外, 供电企业的经营管理逐渐向精细化方向发展, 对电能计量设备的质量管理亟需基于电能计量设备运行的大数据^[12-16]研究更为完善和全面的运行质量评估指标、模型与方法。

在此背景下, 基于电能计量设备的运行监测大数据, 提出了衡量电能计量设备质量的评估指标(即负荷采集可用率、数据采集完整率、平均无故障工作时间、运行异常报警次数、运行故障率), 然后构

建了基于理想点法^[17-18]的电能计量设备质量评估模型, 并采用基于熵权和斯皮尔曼等级相关系数的 CRITIC 方法确定质量评估指标的客观权重^[19-20]。最后, 以浙江省宁波市某地区的电能计量设备运行监测数据为例对所提出的模型和方法进行了验证。

1 电能计量设备质量评估指标

为了较为全面地评估电能计量设备质量的优劣, 这里将从 5 个不同的角度提出反映电能计量设备质量优劣的指标, 即负荷采集可用率、数据采集完整率、平均无故障工作时间、运行异常报警次数和运行故障率指标。在实际的用采信息系统中, 可以根据收集到的数据计算上述 5 个指标, 下面将详细介绍这些指标的定义和计算公式。

1.1 负荷采集可用率

电能计量设备在用户侧采集与负荷的相关数据时因为电流、电压突变以及电磁干扰等因素会产生坏数据, 因此在负荷采集数据进入评估系统前首先要剔除不可用数据, 留下可用的采集数据进行质量评估。可用数据越多说明电能计量设备采集越稳定、质量越好, 因此定义负荷采集可用率为

$$I_{\text{SAMP}} = \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^L \frac{e_{ij}}{E_{ij}} \omega_{\text{SAMP},j} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Q 表示该供应商生产的电能计量设备总批次数; L 表示某一批次设备安装的总区域数; E_{ij} 和 e_{ij} 分别表示第 i 个批次设备在第 j 个安装区域中的总负荷采集量和经剔除坏数据后评估系统可用的负荷采集量。 $\omega_{\text{SAMP},j}$ 是表征第 j 个区域中非质量因素对负荷采集可用率产生影响的修正因子,

$$0 \leq \omega_{\text{SAMP},j} \leq 1 \text{ 且 } \sum_{j=1}^L \omega_{\text{SAMP},j} = 1。$$

1.2 数据采集完整率

实际的电能计量设备在采集各项数据时可能会出现某几个时刻或某一时间段内采集不到数据的情况, 即数据采集不完整, 这会导致计量系统产生相应的计量误差。因此, 数据采集越完整, 电能计量设备的计量结果越精确, 定义数据采集完整率为

$$I_{\text{INT}} = \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^L \frac{\varphi_{ij}}{\psi_{ij}} \omega_{\text{INT},j} \times 100\% \quad (2)$$

式中: ψ_{ij} 和 φ_{ij} 分别表示第 i 个批次的电能计量设备在第 j 个安装区域中的理论应采集数据量和实际采集数据量; $\omega_{\text{INT},j}$ 是表征第 j 个区域中非质量因素对数据采集完整产生影响的修正因子, $0 \leq \omega_{\text{INT},j} \leq 1$ 且

$$\sum_{j=1}^L \omega_{\text{INT},j} = 1。$$

1.3 平均无故障工作时间

平均无故障工作时间(Mean Time Between Failures, MTBF)是指电能计量设备发生第一次故障前能够正常运行的平均时间。这是衡量电能计量设备可靠性的重要参数,平均无故障时间越长,电能计量设备的可靠性越高。考虑其安装区域等因素将电能计量设备的平均无故障工作时间定义为

$$I_{\text{MTBF}} = \sum_{j=1}^L \left(\frac{\sum_{k=1}^{N_j} T_{\text{F},jk}}{N_j} \omega_{\text{MTBF},j} \right) \quad (3)$$

式中: N_j 是第 j 个安装区域的电能计量设备数; $T_{\text{F},jk}$ 是第 j 个安装区域中第 k 个设备发生首次故障时距离初始运行的时间; $\omega_{\text{MTBF},j}$ 是表征第 j 个区域非质量因素对无故障工作时间产生影响的修正因子,

$$0 \leq \omega_{\text{MTBF},j} \leq 1 \text{ 且 } \sum_{j=1}^L \omega_{\text{MTBF},j} = 1。$$

1.4 运行异常报警次数

电能计量设备在运行时,往往会出现较多异常报警信息,其中与计量设备故障相关的异常报警信息主要分为如下三大类:电量异常(包括电能表示值不平、电能表飞走、电能表倒走、电能表停走、需量异常、自动核抄异常等)、电压电流异常(包括电压失压、电压断相、电压越限、电压不平衡、电流失流、电流不平衡等)和时钟异常。为了评估电能计量设备的质量,将异常报警信息的次数之和定义为

$$I_{\text{WARN}} = \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^L (N_{ij}^E + N_{ij}^{PC} + N_{ij}^T) \quad (4)$$

式中, N_{ij}^E 、 N_{ij}^{PC} 和 N_{ij}^T 分别表示第 i 个批次的产品在第 j 个安装区域的电量异常报警次数、电压电流异常报警次数和时钟异常报警次数。

1.5 运行故障率

电能计量设备在出厂时厂家提供了其标称的使用寿命小时数,在实际运行时电能计量设备可能会出现发生故障后经自复位或检修后继续运行的情况。故障时,电能计量设备停止工作,停机时间越长,其造成计量偏差越大,在综合评估中质量越差。因此,将运行故障率定义为

$$I_{\text{FAULT}} = \sum_{j=1}^L \left(\frac{\sum_{k=1}^{N_j} T_{\text{stop},jk}}{\sum_{k=1}^{N_j} T_{\text{rate},jk}} \cdot \omega_{\text{FAULT},j} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中: $T_{\text{rate},jk}$ 和 $T_{\text{stop},jk}$ 分别是第 j 个安装区域中第 k 台电能计量设备标称运行时间和故障停机时间;

$\omega_{\text{FAULT},j}$ 是表征第 j 个区域非质量因素对故障停机产生影响的修正因子, $0 \leq \omega_{\text{FAULT},j} \leq 1$ 且

$$\sum_{j=1}^L \omega_{\text{FAULT},j} = 1。$$

2 基于 CRITIC 法和理想点法的电能计量设备质量评估

由于上述的负荷采集可用率、数据采集完整率、平均无故障工作时间、运行异常报警次数和运行故障率这 5 个指标都仅从某一个方面反映电能计量设备质量优劣。为了将这些指标综合起来,从而更加全面地评价电能计量设备的质量,本节首先引入基于 CRITIC 法的客观赋权法确定各个指标的权重,并将电能计量设备评价问题转化为一个多属性决策问题,然后利用多属性决策方法中的理想点法进行求解。

2.1 基于 CRITIC 法的客观权重赋权法

CRITIC 法是多属性决策问题中一种指标权重的客观赋权法^[20],该方法是基于评估指标的差异程度和评估指标间的相关性来确定评估指标的客观权重。这里采用熵(Entropy)^[13,19]和斯皮尔曼等级相关系数(Spearman's rank correlation coefficient)^[21]分别来衡量指标在不同评价对象的取值差异性(即评价指标的对比强度)和评价指标之间的冲突性。

熵在信息论中用于量测信息的不确定性或无序状态。在具有 M 个评价指标和 N 个待评价方案的决策问题中,第 i 个评价指标的熵定义为

$$H_i = -\beta \sum_{j=1}^N f_{ij} \ln f_{ij} \quad i=1,2,\dots,M \quad (6)$$

式中: $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^N r_{ij}}$; $\beta = \frac{1}{\ln N}$; 并且假定,当 $f_{ij}=0$

时, $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。其中, r_{ij} 为计量设备评估问题的决策矩阵的元素值,其含义详见 3.2 节。因此,在具有 M 个评价指标, N 个待评价方案的决策问题中,第 i 个评价指标的熵权 w_i 定义为

$$w_i = \frac{1 - H_i}{M - \sum_{i=1}^M H_i} \quad (7)$$

式中: $0 \leq w_i \leq 1$; $\sum_{i=1}^M w_i = 1$ 。从熵和熵权的定义可以得到:熵和熵权的取值成反比,熵值越大,熵权

越小; 反之, 熵值越小, 熵权越大。如果某个指标的所有值都相等, 那么该指标的熵等于 1, 其熵权等于 0; 如果某个指标的所有值差异很大, 那么该指标的熵较小, 其熵权较大, 这说明该指标能够较好地区别出电能计量设备的质量。

斯皮尔曼等级相关系数是统计学中反映两组等级变量相关程度的一种相关系数^[21]。斯皮尔曼等级相关系数对数据条件的要求没有积差相关系数严格, 只要两个变量的观测值是成对的等级评定资料, 或者是由连续变量观测资料转化得到的等级资料, 不论两个变量的总体分布形态、样本容量的大小如何, 都可以用斯皮尔曼等级相关来进行研究。

对于都具有 N 个元素的两列变量 $\mathbf{Z}_j^C = (z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{Nj})^T$ 和 $\mathbf{Z}_k^C = (z_{1k}, z_{2k}, \dots, z_{Nk})^T$, 其第 i 个变量值分别为 z_{ij} 和 z_{ik} ($1 \leq i \leq N$), 其中 $j \in \{1, 2, \dots, M\}$, $k \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。假设 \mathbf{Z}_j^C 和 \mathbf{Z}_k^C 的排序值向量分别为 $\mathbf{Z}_j^R = (z_{1j}^R, z_{2j}^R, \dots, z_{Nj}^R)^T$ 和 $\mathbf{Z}_k^R = (z_{1k}^R, z_{2k}^R, \dots, z_{Nk}^R)^T$, 其中 z_{ij}^R 和 z_{ik}^R 分别为 z_{ij} 和 z_{ik} 在 \mathbf{Z}_j^C 和 \mathbf{Z}_k^C 的排序值。因此, 第 j 个和第 k 个指标之间的斯皮尔曼等级相关系数可以定义为

$$\rho_{ik} = \frac{\text{cov}(\mathbf{Z}_j^R, \mathbf{Z}_k^R)}{\sigma_{\mathbf{Z}_j^R} \sigma_{\mathbf{Z}_k^R}} = \frac{\sum_{i=1}^N (z_{ij}^R - \bar{z}_j^R)(z_{ik}^R - \bar{z}_k^R)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (z_{ij}^R - \bar{z}_j^R)^2 \times \sum_{i=1}^N (z_{ik}^R - \bar{z}_k^R)^2}} \quad (8)$$

式中: $\text{cov}(\mathbf{Z}_j^R, \mathbf{Z}_k^R)$ 为排序值向量 \mathbf{Z}_j^R 和 \mathbf{Z}_k^R 的协方差; $\sigma_{\mathbf{Z}_j^R}$ 和 $\sigma_{\mathbf{Z}_k^R}$ 分别为排序值向量 \mathbf{Z}_j^R 和 \mathbf{Z}_k^R 的标准差; \bar{z}_j^R 和 \bar{z}_k^R 分别为排序值向量 \mathbf{Z}_j^R 和 \mathbf{Z}_k^R 的均值。因此, 第 j 个指标与其他指标的整体肯德尔相关系数可以定义为

$$\rho_j = \sum_{k=1}^M \rho_{jk} / M \quad (9)$$

当指标 j 的斯皮尔曼等级相关系数为 1 时, 表明该指标与其他指标具有一致的等级相关性; 而斯皮尔曼等级相关系数为 0 时, 则表明该指标与其他指标是相互独立的。

从上述可以看出, 熵和斯皮尔曼等级相关系数分别可以用于衡量评价指标的对比强度和评价指标之间的冲突性, 因此综合熵和斯皮尔曼等级相关系数可以用于确定各个指标的客观权重, 即指标 j 的客观权重可以表示为

$$C_j = \frac{w_j(1 - \rho_j)}{\sum_{k=1}^M w_k(1 - \rho_k)} \quad (10)$$

2.2 基于理想点法的计量设备质量评估模型

理想点法(TOPSIS 法)属于一种理想目标相似性的多属性决策方法^[17-18], 该方法根据被评估对象与理想化目标的逼近程度来排序, 即通过计算被评估对象与理想解(实际中由所有指标的最优值组成)和反理想解(实际中由所有指标的最差值组成)的距离来排序。若被评估的对象最逼近理想解且距离反理想解最远, 则该评估对象最优; 反之, 若被评估的对象最逼近反理想解且距离理想解最远, 则该评估对象最差。

在对电能计量设备质量的供应商评估中, 假设待评价的电能计量设备供应商共有 N 个, 共有 N_{PM} 个电能计量设备, 选取的用于衡量供应商的电能计量设备质量的评价指标共有 M 个。因此, 电能计量设备质量评估问题的决策矩阵可以表示为

$$\mathbf{r} = [I_{\text{SAMP}}, I_{\text{INT}}, I_{\text{MTBF}}, I_{\text{WARN}}, I_{\text{FAULT}}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{N_{PM}1} & r_{N_{PM}2} & \dots & r_{N_{PM}M} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, r_{ij} 表示电能计量设备 i 对应的指标 j 的指标值, 其中 $i \in \{1, 2, \dots, N_{PM}\}$, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。在本文中 M 等于 5。

因为电能计量设备评估指标的量纲不一样, 指标值之间没有可比性, 且不同供应商的正在运行的电能计量设备数目不一样。为了使得指标值之间具有一定的可比性以及更为合理地对供应商进行评估, 这里需要对所有电能计量设备下的各个指标原始值进行无量纲化处理或标准化处理, 然后对标准化处理后同一个供应商的电能计量设备的指标值取平均值来代表该供应商的电能计量设备的质量指标。此外, 指标又可分为成本型和效益型两种类型, 其中成本型的指标取值越大越差, 而效益型的指标取值越小越差。故需要分别对成本型和效益型这两种类型的指标分别采用如下的无量纲化或标准化处理。其中, 成本型指标的标准化处理公式为

$$y'_{ij} = \frac{\max_j \{r_{ij}\} - r_{ij}}{\max_j \{r_{ij}\} - \min_j \{r_{ij}\}} \quad (12)$$

效益型指标的标准化处理公式为

$$y'_{ij} = \frac{r_{ij} - \min_j \{r_{ij}\}}{\max_j \{r_{ij}\} - \min_j \{r_{ij}\}} \quad (13)$$

接着, 形成每个供应商对应的各个指标的决策矩阵, 如式(14)。

$$y'' = (y''_{kj})_{N \times M} \quad (14)$$

式中, $y''_{kj} = \sum_{k' \in \Omega_k} y'_{k'j}$, Ω_k 表示属于供应商 k 生产的电能计量设备的集合。

因此, 电能计量设备供应商评估问题的理想点法的决策流程如下。

步骤 1 生成标准化电能计量设备供应商评估决策矩阵。

$$Y = (y_{ij})_{N \times M} \quad (15)$$

式中, $y_{ij} = y''_{ij} / \sqrt{\sum_{k=1}^N (y''_{kj})^2}$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

步骤 2 生成加权后的电能计量设备供应商评估矩阵。

$$Z = (z_{ij})_{N \times M} \quad (16)$$

式中, $z_{ij} = C_j y_{ij}$ 。

步骤 3 确定电能计量设备供应商评估问题的理想解 $I^* = (I_1^*, I_2^*, \dots, I_M^*)$ 和反理想解 $I^- = (I_1^-, I_2^-, \dots, I_M^-)$, 其中 $I_j^* = \max_i z_{ij}$, $I_j^- = \min_i z_{ij}$, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

步骤 4 计算电能计量设备供应商评估分别与理想解和反理想解的欧氏距离 S_i^* 和 S_i^- 。

$$S_i^* = \|Z_i^R - I^*\| = \sqrt{\sum_{j=1}^M (z_{ij} - I_j^*)^2} \quad (17)$$

$$S_i^- = \|Z_i^R - I^-\| = \sqrt{\sum_{j=1}^M (z_{ij} - I_j^-)^2} \quad (18)$$

式中: $Z_i^R = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iM})$ 为加权后的电能计量设备供应商评估矩阵 Z 的第 i 行。

步骤 5 计算各个电能计量设备供应商与理想解的相对逼近度。

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (19)$$

电能计量设备供应商与理想解的相对逼近度的取值范围为 $[0, 1]$, 该值愈逼近 1, 则表明该供应商生产的电能计量设备质量越好; 反之, 该值愈逼近 0, 则表明该供应商生产的电能计量设备质量越差。

步骤 6 按照各个电能计量设备供应商与理想解的相对逼近度大小, 对电能计量设备供应商进行重要性程度排序, 从而得到电能计量设备供应商重要度的评估结果。

3 算例分析

本节采用国网浙江省电力公司宁波供电公司管

辖的某地区电能计量设备数据进行算例仿真, 该原始数据集共有 11 565 条数据, 经过数据清洗之后可用的数据为 11 312 条, 共有 17 个待评价的电能计量设备供应商, 每个供应商下有若干设备批次, 所有的设备批次为 58 个批次。表 1 给出了标准化后各个供应商的电能计量设备质量评估矩阵。

表 1 标准化后的电能计量设备质量评价指标值

Table 1 Normalized indexes' values of quality evaluation for the suppliers of power metering equipment

供应商编号	I_{SAMP}	I_{INT}	I_{MTBF}	I_{WARN}	I_{FAULT}
1	0.975	0.970 5	0.204 5	0.986 4	0.556 3
2	0.979 9	0.995 0	0.026 2	0.999 8	0.991 9
3	0.984 3	0.968	0.189 9	0.994 4	0.697 6
4	0.981 0	0.963 5	0.319 2	0.979 6	0.275 8
5	0.981 2	0.757 4	0.431 6	0.998 5	0.915 5
6	0.985 7	0.938 7	0.480 6	0.993 2	0.728 6
7	0.981 2	0.971 1	0.312 1	0.997 9	0.894 4
8	0.987 0	0.986 5	0.073 3	0.980 6	0.424 4
9	0.981 5	0.918 9	0.606 1	0.996 8	0.705 6
10	0.981 3	0.918 0	0.790 6	0.999 7	0.977
11	0.972 8	0.945 3	0.440 3	0.941 9	0.510 4
12	0.981 6	0.986	0.143 8	0.995 5	0.836 2
13	0.981 2	0.975 5	0.227 3	0.998 8	0.907 0
14	0.981 2	0.976 0	0.174 7	0.999 2	0.955 7
15	0.981 2	0.989 5	0.076 1	0.998 6	0.933 2
16	0.981 2	0.960 6	0.165 4	0.999 0	0.967 2
17	0.981 2	0.987 9	0.162 8	0.995 0	0.666 7

首先, 根据各个指标的定义计算电能计量设备供应商各个指标的数值, 从而形成电能计量设备综合评估问题的的决策矩阵, 然后对其标准化处理; 接着, 根据熵、熵权和斯皮尔曼等级相关系数的定义, 分别计算各个指标的熵、熵权、斯皮尔曼等级相关系数以及客观综合权重, 其结果如表 2 所示。

表 2 各个指标的熵、熵权、相关系数和综合权重

Table 2 Entropy, entropy weight, Spearman's rank correlation coefficient and combined weight

指标	I_{SAMP}	I_{INT}	I_{MTBF}	I_{WARN}	I_{FAULT}
熵	0.962 4	0.976 3	0.894 4	0.975 8	0.955 1
熵权	0.159 1	0.100 4	0.447 6	0.102 4	0.190 5
相关系数	0.307 6	0.054 8	0.047 8	0.408 6	0.322 3
综合权重	0.160 7	0.096 8	0.427 5	0.110 3	0.204 8

从表 2 可以看出: 平均无故障工作时间指标具有最小的熵, 其值为 0.894 4, 这表明各个供应商在该指标上的取值差别最大, 故其熵权最大(取值为 0.447 6), 即该指标给供应商的综合质量评估提供了较多有用的信息, 故该指标在供应商的综合质量评估中的比重应较大; 数据采集完整率指标具有最大

的熵, 其值为 0.976 3, 这表明各个供应商在该指标上的取值差别最小, 故其熵权最小(取值为 0.100 4), 即该指标给供应商的综合质量评估提供了较少有用的信息, 故该指标在供应商的综合质量评估中的比重应较小。此外, 从表 2 还可以看出: 平均无故障工作时间指标具有最小的斯皮尔曼等级相关系数, 其值为 0.047 8, 这表明该指标和其他指标的相关性最小, 即该指标提供的有用信息和其他指标重合度不大, 因此该指标在节点的综合重要度评估中的比重应较大; 运行故障率指标具有最大的斯皮尔曼等级相关系数, 其值为 0.322 3, 这表明该指标和其他指标的相关性较大, 提供的有用信息重合度较大, 因此该指标在节点的综合重要度评估中的比重应较小。从 5 个指标的定义可以看出, 平均无故障工作时间与运行异常报警次数、运行故障率这两个指标基本上不相关, 而与负荷采集可用率、数据采集完整率这两个指标有一定的关系, 但相关性不强, 经计算得到的该指标的斯皮尔曼等级相关系数最小, 因此这与该指标的实际相关性是吻合的; 运行故障率与平均无故障工作时间、负荷采集可用率、数据采集完整率和这 3 个指标非常相关, 经计算得到该指标的斯皮尔曼等级相关系数取值最大, 因此这也与该指标的实际相关性相吻合。综合熵权和斯皮尔曼等级相关系数后, 可以得到 5 个指标的综合客观权重分别为: 0.160 7、0.096 8、0.427 5、0.110 3 和 0.204 8。从中可以看出: 经过综合后, 平均无故障工作时间指标具有最大的权重, 而数据采集完整率指标具有最小的权重; 考虑了指标的相关性后, 平均无故障工作时间指标的客观综合权重比未考虑相关性的熵权小了一些, 而运行故障率指标比未考虑相关性的熵权大了一些。

接着, 计算供应商的电能计量设备质量评估问题的理想解和反理想解, 进而得到各供应商分别与理想解和反理想解的欧氏距离, 在此基础上分别计算各个供应商与理想解的相对逼近度, 其结果如表 3 所示。从表 3 可以看出: 电能计量设备的运行质量最好的前 10 家供应商分别为: 10、9、6、5、11、7、4、13、14 和 16, 其中供应商 10 生产的电能计量设备的运行质量最优, 供应商 9 生产的电能计量设备的运行质量次优。

此外, 为了验证所提方法的有效性, 表 3 给出了采用熵权法^[19]、Gini 系数法^[22]以及本文方法评估得到的供应商计量设备质量结果。对比基于本文方法和基于熵权法、基于 Gini 系数法的电能计量设备的运行质量评估结果可以看出: 采用本文方法和采用熵权法、Gini 系数法得到的电能计量设备质量评

表 3 基于本文方法和基于熵权法、Gini 系数法的供应商电能计量设备质量评估结果比较

Table 3 Comparison of the results of quality evaluation for the suppliers based on the proposed method, entropy weight method, and Gini coefficient method

供应商 编号	熵权法		Gini 系数法		本文方法	
	得分	排序	得分	排序	得分	排序
1	0.551 1	15	0.341 6	15	0.241 2	11
2	0.558 9	13	0.339 2	16	0.166	16
3	0.573 5	11	0.369 6	11	0.236 6	12
4	0.548 5	16	0.343 5	14	0.372 2	7
5	0.702 0	4	0.582 6	3	0.542 8	4
6	0.706 7	3	0.573 2	4	0.595 9	3
7	0.665 9	5	0.505 2	5	0.396 5	6
8	0.470 1	17	0.218 1	17	0.075 9	17
9	0.756 2	2	0.651 1	2	0.751 4	2
10	0.890 7	1	0.848 7	1	0.991 0	1
11	0.640 4	6	0.487 1	6	0.533 6	5
12	0.580 8	10	0.376 4	10	0.205 7	13
13	0.630 8	7	0.451 5	7	0.300 2	8
14	0.616 7	8	0.429	8	0.251 6	9
15	0.569 5	12	0.356 9	12	0.172 0	15
16	0.613 1	9	0.425 2	9	0.244 4	10
17	0.557 1	14	0.343 9	13	0.202 8	14

估结果中排名前 2 的供应商是一致的; 且有 9 个供应商都在排名前 10 的集合中, 只是排序稍微有所区别。因此, 这在一定程度上表明本文所提的方法可以较好地地从电能计量设备的运行质量方面对供应商进行评估, 具有一定的有效性。此外, 从表 3 的对比结果还可以看出: 采用本文方法和采用熵权法、Gini 系数法得到的电能计量设备质量评估结果中排名前 10 的供应商集合中, 有较大区别的供应商分别为供应商 4 和 12, 其中本文方法评估的结果是供应商 4 位于质量评估前 10 位, 且优于供应商 12; 熵权法和 Gini 系数法的结果是供应商 12 位于质量评估前 10 位, 且优于供应商 4。

从表 1 可以看出: 供应商 4 和 12 的负荷采集可用率、数据采集完整率和运行异常报警次数这 3 个指标的取值差别不大, 而平均无故障工作时间和运行故障率指标值差别较大; 供应商 4 的平均无故障工作时间指标大于供应商 12, 运行故障率指标小于供应商 12。从表 2 可以看出, 平均无故障工作时间指标与其他 4 个指标的信息重复度较小, 而运行故障率指标与其他 4 个指标的信息重复较大。因此, 运行故障率指标在其他 4 个指标的数值中已部分体现, 故对其权重应适当降低; 反之, 平均无故障工作时间的权重应适当增大。由于其他方法没有考虑指标之间的相关性, 使得运行故障率指标对综

合质量评估结果影响过大,而本文方法正是考虑了各指标间的相关程度,适当减少了该指标的权重,从而使得本文方法对供应商4的评估结果排在前10内,而把供应商12的评估结果排在前10外。综上所述,与熵权法、Gini系数法相比,本文提出的方法能够计及指标之间的相关性,在一定程度上能够较为合理地对供应商的电能计量设备的质量进行评估。

此外,本文所提的计量设备运行质量评估方法已嵌入国网浙江省电力有限公司的电力用户用电信息采集系统并试运行。截至目前为止,该系统已采集浙江省346万台终端、2760万台表计的数据,共有终端厂家63个,终端型号14个,终端批次1324个;表计厂家85个,表计型号42个,表计批次5684个。该电力用户用电信息采集系统依托大数据挖掘平台^[23],利用Hadoop集群技术和Ambari统一管理平台,通过spark的离线处理,仅需6h左右的时间,便可以完成所有计算,相比原来需要十几天的计算时间,速度提升了近30倍。该电力用户用电信息采集系统的界面及运行之后的评价结果如图1所示。



图1 电力用户用电信息采集系统界面

Fig. 1 Interface of acquisition system for power consumers' information

4 结论

基于电能计量设备的运行监测大数据,提出了衡量电能计量设备质量的负荷采集可用率、数据采集完整率、平均无故障工作时间、运行异常报警次数、运行故障率5个评估指标,然后构建了基于理想点法的电能计量设备质量评估模型,并采用基于熵权和斯皮尔曼等级相关系数的CRITIC方法确定质量评估指标的客观权重,较好地顾及了评估指标的差异程度和评估指标间的相关性。最后,以国网浙江省电力公司宁波供电公司管辖的某地区电能计量设备运行数据为例对所提出的模型和方法进行了

验证。算例分析结果表明所提出的方法能够计及指标之间的相关性,能够较为合理地对电能计量设备的运行质量进行评估,能够为物资管理、营销计量专业部门提供科学合理的评价支撑。但同时本文提出的方法也有一定不足,例如指标提取较困难、数据质量不够高以及计算速度不够快等。因此,本文所提方法应用的前提条件是用电信息采集系统数据库较完备,并且其数据库中的坏数据较少;考虑其计算时间和实用性,本文所提方法主要适用于已具备大数据计算能力的系统和平台。

参考文献

- [1] 贾晋峰, 易浩民, 夏向阳, 等. 分布式能源接入电力系统的新型计量系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 118-124.
JIA Jinfeng, YI Haomin, XIA Xiangyang, et al. Distributed energy power system access new metering system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 118-124.
- [2] 苏慧玲, 刘建, 龚丹, 等. 大规模电能计量器具智能检定的优化调度策略探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 75-79.
SU Huiling, LIU Jian, GONG Dan, et al. Optimal operation on large-scale automation verification of electrical power measuring instruments[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 75-79.
- [3] 黄德华, 余涛, 张水平. 配网电能质量监测与高级分析软件平台的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 128-133.
HUANG Dehua, YU Tao, ZHANG Shuiping. Design and implementation of a power quality monitoring and advanced analysis software in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 128-133.
- [4] 何艺, 秦丽娟. 基于改进AHP和熵权法的计量自动化终端质量综合评价研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(23): 58-62.
HE Yi, QIN Lijuan. Research on comprehensive assessment of metering automation terminal quality based on the improved AHP and entropy method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(23): 58-62.
- [5] 孟明, 舒展. 基于缺陷扣分法和三角模糊数层次分析法的智能电能表全生命周期质量评价[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 88-93.
MENG Ming, SHU Zhan. Full quality evaluation on smart meters based on the defect deduction method and the AHP of triangular fuzzy number[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 88-93.
- [6] 黄俐萍, 王卉, 杜卫华. 电能计量装置运行评价方法研究[J]. 华东电力, 2014, 42(11): 2322-2326.
HUANG Liping, WANG Hui, DU Weihua. Operation evaluation methods for energy metering devices[J]. East China Electric Power, 2014, 42(11): 2322-2326.
- [7] 罗群, 葛春萌, 孙虹, 等. 关口电能表状态评价技术研

- 究[J]. 电子测试, 2017(1): 34-35.
- LUO Qun, GE Chunmeng, SUN Hong, et al. Study on the state evaluation technology of gateway electric energy meter[J]. Electronic Test, 2017(1): 34-35.
- [8] 依溥治, 徐人恒, 张明远, 等. 基于云平台的电能表可靠性预计系统设计与实现[J]. 电测与仪表, 2017, 54(5): 96-100.
- YI Puzhi, XU Renheng, ZHANG Mingyuan, et al. Design and implementation of the watt-hour meter reliability prediction system based on cloud platform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(5): 96-100.
- [9] 吴晓昱, 黄艳, 王焕宁, 等. 智能电表计量评价体系及实时监控平台的研究与建立[J]. 电测与仪表, 2014, 51(16): 57-60.
- WU Xiaoyu, HUANG Yan, WANG Huanning, et al. Research on smart meter measurement evaluation system and establish real-time monitoring platform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(16): 57-60.
- [10] 巨汉基, 袁瑞铭, 丁恒春, 等. 智能电能表全生命周期质量评价方法研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(16): 55-58.
- JU Hanji, YUAN Ruiming, DING Hengchun, et al. Research on smart meter full lifecycle quality evaluation method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(16): 55-58.
- [11] 徐卓, 赵山, 黄友朋, 等. 基于量化模型的电能计量器具综合质量评价方法研究和实践[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 170-173.
- XU Zhuo, ZHAO Shan, HUANG Youpeng, et al. Research and practice of electric energy metering device comprehensive quality evaluation based on quantitative model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 170-173.
- [12] MAMATJAN Y, GRYCHTOL B, GAGGERO P, et al. Evaluation and real-time monitoring of data quality in electrical impedance tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2013, 32(11): 1997-2005.
- [13] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 29-34.
- DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 29-34.
- [14] MERINO J, CABALLERO I, RIVAS B, et al. A data quality in use model for big data[J]. Future Generation Computer Systems, 2015, 51(1): 65-74.
- [15] 赵庆周, 李勇, 田世明, 等. 基于智能配电网大数据分析的状态监测与故障处理方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 774-780.
- ZHAO Qingzhou, LI Yong, TIAN Shiming, et al. A state estimation and fault processing method based on big data analysis of smart distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 774-780.
- [16] 张友强, 寇凌峰, 盛万兴, 等. 配电变压器运行状态评估的大数据分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 768-773.
- ZHANG Youqiang, KOU Lingfeng, SHENG Wanxing, et al. Big data analytical method for operating state assessment of distribution transformer[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 768-773.
- [17] 李正明, 施诗, 潘天红, 等. 基于灰色关联度和理想解法的电能质量综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 14-19.
- LI Zhengming, SHI Shi, PAN Tianhong, et al. A synthetic power quality assessment method based on grey correlation analysis and TOPSIS method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 14-19.
- [18] 杨家莉, 徐永海. 基于组合赋权与 TOPSIS 模型的节点电压暂降严重程度综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 88-95.
- YANG Jiali, XU Yonghai. Comprehensive evaluation method of node voltage sag severity based on TOPSIS model and combination weights[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 88-95.
- [19] LIN Z Z, WEN F S, ZHAO J H, et al. Controlled islanding schemes for interconnected power systems based on coherent generator group identification and wide-area measurements[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 440-453.
- [20] 张立军, 张潇. 基于改进 CRITIC 法的加权聚类方法[J], 统计与决策, 2015, 31(22): 65-68.
- ZHANG Lijun, ZHANG Xiao. Weighted clustering method based on revised CRITIC[J]. Statistics and Decision, 2015, 31(22): 65-68.
- [21] AGRESTI A. Analysis of ordinal categorical data[M]. New York: John Wiley & Sons, 2010.
- [22] FAN Wenli, HU Ping, LIU Zhigang. Multi-attribute node importance evaluation method based on Gini-coefficient in complex power grids[J]. IET Generation, Transmission, and Distribution, 2016, 10(9): 2027-2034.
- [23] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 19-28. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-04-07

作者简介:

杨光盛(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 技师, 研究方向为电能计量及用电信息采集技术; E-mail: 1176914842@qq.com

崔幼(1974—), 女, 本科, 助理工程师, 高级技师, 研究方向为电能计量及用电信息采集技术; E-mail: cuiyou88@163.com

宣玉华(1973—), 男, 本科, 工程师, 高级技师, 研究方向为电能计量及用电信息采集技术。E-mail: yueyi95@139.com

(编辑 周金梅)