

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.033

基于改进熵权法的DPV电能质量评估

马春艳^{1,2}, 刘惠康¹, 龚 璘³

(1. 武汉科技大学信息科学与工程学院, 武汉 430081; 2. 湖北汽车工业学院电气信息工程学院, 湖北 十堰 442002;
3. 广东电网佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: 由于传统电能质量评估方法无法体现“分布式”特征, 难以评估分布式光伏电能质量。为了解决这一问题, 首先对主观赋权法和客观赋权法进行综合比较, 提出采用熵权法进行赋权。然后引入改进AHP和指标极化处理, 对熵权法进行改进。建立涵盖输入、过程和输出3方面的指标体系, 采用改进熵权法进行评估。实例表明, 改进熵权法能较为充分地利用实测的小样本数据, 能较好地体现“分布式”特征, 可以为分布式光伏电能质量评估提供参考。

关键词: 改进熵权法; 分布式光伏; 电能质量评估; 权重确定; 指标体系

Power Quality Assessment of Distributed Photovoltaic by Improved Entropy Weight Method

MA Chunyan^{1,2}, LIU Huikang¹, GONG Ying³

(1. College of Information Science and Engineering, University of Wuhan Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, University of Hubei Automotive Technology, Hubei Shiyan 442002, China;
3. Foshan Electric Power Supply Bureau, Guangdong Foshan 528000, China)

Abstract: The traditional methods for evaluation of electric energy quality can not reflect the distribution feature, and they also can not be used to assess the distributed photovoltaic power quality. In order to solve this problem, the subjective weight and objective weight methods are conducted in the comprehensive comparison, and the entropy method is proposed to empower. Then the improved AHP and indicators polarization processing are introduced to improve the entropy method. The evaluation system covering three aspects of input, process and output is established, and the improved entropy weight method is used to assessment. Example shows that the improved entropy weight method can better reflect the distribution feature, can more fully utilize the measured data, and can provide reference for power quality assessment of distributed photovoltaic.

Key words: improved entropy weight; distributed photovoltaic; power quality assessment; determining weight; index system

0 引言

分布式光伏(distributed photovoltaic, DPV)电源具有因地制宜和清洁高效的特点, 能较好地缓解能源短缺和环境污染问题^[1]。但分布式光伏电能并入配电网后, 改变了已有电网的结构, 可能导致节点电压超过允许电压, 或者导致分布式光伏电源运行在非计划孤岛状态^[2]。这些不利影响会使电能质量下降,

因此在分布式光伏电源并入已有配电网运行时, 必须对电能质量进行综合评估, 判断电能质量的级别, 以便采取相应措施, 提高电能质量, 并增强电网安全。

传统电能质量评估方面的研究可以提供一定借鉴^[3-12]。但是在分布式光伏电能质量评估时, 不能回避“分布式”这一特征, 否则与传统电能质量评估差别不大。已经有文献注意到这一问题, 文[13]从清洁能源的角度进行了分析, 考虑了电网 CO₂ 排放量。文[14]建构了分布式电源电能质量的综合评估指标体系, 采用数据包络分析法。但是该文重点在

收稿日期: 2015-12-16; 修回日期: 2016-01-23

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(B2015122)。

Project Supported by Science and Technology Research Project of Education Department of Hubei Province(B2015122).

指标体系建立, 所提出的方法并未能很好地解决“分布式”这一特征要求。文[15]提出了突变决策方法, 该方法虽然避免了对电能质量指标进行赋权, 但是与一般电能质量评估并无实质性区别, 仅方法的应用对象不同。

一般电能质量评估时, 每个指标只需一个数据。而分布式光伏电能的“分布式”这一特征, 使得在进行综合评估时, 需要监测多个站点信息。也就是说, 每个指标需要采集多个样本数据, 才能体现分布式特征^[14]。对于这类具有多个样本数据的指标, 如何进行合理赋权, 成为一个关键难题。权重的赋值合理与否, 对评价结果的科学合理性有严重影响。若某一指标的权重发生变化, 将会影响整个评价结果。笔者在对比分析主观赋权法和客观赋权法两大类的特征基础上, 提出运用熵权法进行赋权, 是最适合“分布式”这一特征的方法。并针对分布式光伏电能质量评估的特征和需要, 对传统熵权法进行了改进, 并建立了评估指标体系, 最后用实例证明了该方法的应用过程。

1 熵权法的抉择

1.1 主观赋权法和客观赋权法的比较

按照权数产生方法的性质, 可以分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权法是由人为经验引导而产生权数, 如主观判断法、功效系数法、层次分析 (analytic hierarchy process, AHP) 法、

德尔菲(Delphi)法、综合评分法、排序法、模糊赋权法、指数加权法和集值迭代法等 10 种^[16-17]。这类方法不需要原始数据, 只需要评价专家根据自身经验来进行判断。客观赋权法的缺点是主观随意性大, 选取的专家不同和专家数量不同, 则得到的结果会有很大差异。其优点是不需要指标的原始数据, 且操作过程比较简单, 易于快速掌握和实践应用。

另一类客观赋权法, 这类方法根据各指标、各因素的已有原始数据, 进行评价确定权数。目前主要方法有熵权法、主成分分析法、拉开档次法、神经网络分析法、回归系数法、因子分析法、灰色关联分析法、变异系数法以及均方差法等 9 种^[16, 18]。客观赋权法的缺点是计算过程较复杂, 需要一定数量的原始数据资料, 在实践应用方面难以普及。其优点是依靠实际数据做出判断而非经验, 较好地反映各个指标间的内在逻辑关系。以下对这两大类方法进行比较, 见表 1。

1.2 客观赋权法的综合比较

分布式光伏电能的“分布式”这一特征, 使得在进行综合评估时, 需要采集多个样本数据。因此, 这些样本数据应该加以充分利用。而主观赋权法则没有利用这些宝贵的原始资料, 因此舍弃主观赋权法。客观赋权法是依靠原始数据而做出判断的方法, 因此能够用到分布式光伏电能的原始数据。

表 1 主观赋权法和客观赋权法的比较

Table 1 Comparison of subjective weight and objective weight methods

赋权法类型	主要方法	优点	缺点	适用条件	舍弃或选用理由
主观赋权法	主观判断法、功效系数法、层次分析(AHP)法、Delphi 法、综合评分法、排序法、模糊赋权法、指数加权法和集值迭代法。	①不需要指标的原始数据; ②操作较简单, 易于快速掌握和实践应用。	①主观随意性大; ②评价结果不稳定。	原始数据资料缺失或者数量极少。	舍弃原因: 没有使用原始数据。
客观赋权法	熵权法、主成分分析法、拉开档次法、人工神经网络分析法、回归系数法、因子分析法、灰色关联分析法、变异系数法及均方差法。	①依靠实际原始数据做出判断而非经验; ②较好地反映各个指标间的内在逻辑关系。	①计算过程较复杂; ②需要一定数量的原始数据资料。	有一定数量或数量较多的原始数据。	能用到分布式光伏电能的原始数据。

但是客观赋权法的数量众多, 每种方法都有其适用条件和局限性。因此, 需要针对分布式光伏电能质量评估的需要, 有针对性地分析这些方法的优缺点和适用条件, 从而选择最佳方法。表 2 列出了 9 种客观赋权法的基本原理、适用条件和舍弃理由。在这些方法中, 大部分需要数量很多的原始数据, 仅有灰色关联分析法和熵权法需要的数据数量较少。但是进一步分析, 发现灰色关联分析法

是建立在专家经验判断基础上, 进而得到关联度和权重^[18]。因此该方法仍然不能较充分地利用分布式光伏电能质量原始状态数据, 所以灰色关联分析法也被舍弃。而熵权法能够充分利用原始数据来进行计算, 一般用来进行方案选择, 很适合于小样本数据。综合以上分析, 最终文中选择熵权法, 作为确定分布式光伏电能质量指标权重的唯一方法。

表2 客观赋权法的综合比较

Table 2 Comparison of subjective weight methods

赋权法名称	基本原理	适用条件	舍弃理由
均方差法	对样本数据进行处理,求出平均值和均方差,然后累加均方差,求每个指标的相对均方差大小后得到权重。		需要大量原始数据进行统计分析。
拉开档次法	将由 m 个指标构成的 m 维空间中的 n 个点 (被评价对象) 向某一维空间做投影,使得各点在此空间上的投影点最为分散。根据数据建立函数方程,自变量系数即为权重。		需要大量数据来构建函数方程。
回归系数法	根据原始数据,建立回归方程模型。在得到各个自变量(因素)的系数后,即得到各个因素的相对权重。	原始数据	需要大量数据来构建回归方程。
变异系数法	取值差异越大,也即越难以实现的指标。直接利用各项指标数据计算变异系数,再计算变异系数的相对权重。	量较多	需要样本数量较大,需取得平均值和标准差。
人工神经网络法	模仿人体神经系统,是一个并行、分布处理结构,由处理单元及其称为联接的无向讯号通道互连而成。		需要大量数据进行反复训练。
因子分析法	将相关较密切的几个变量归在同一类中,每类变量成为一个因子,以较少几个因子反映原始资料的大部分信息。		基于大量统计分析。
主成分分析法	将多个变量通过线性变换以选出较少个数重要变量。		基于大量统计分析。
灰色关联分析法	召集专家列出对指标权重的判断值集合,遴选出参考权重集,然后计算两个权重集间的关联度,归一化后得到权重。	原始数据	更多依靠专家经验判断,而非原始数据
熵权法	将一定数量的原始矩阵数据进行标准化后,求得相对权重然后求熵值,进一步得到熵权重。	量较少	—

2 指标体系建立

在建立指标体系过程中,笔者主要考虑有5点:

1)目前大多数有关电能质量评估的文献,只考虑了电压闪变、电压偏差、电压波动等输出性指标,即只考虑最终结果^[3-8]。但是实际上,电能质量还很大程度上受到输入性因素的影响。只考虑输出,而不考虑输入和过程,对电能质量的评估必然不会全面。因此,笔者考虑了输出、输入和过程3个方面;

2)在输入方面,参考文[19-20],光伏电池转换效率、倾角调整率直接影响了太阳能转化为电能的效率和质量。此外,日照时数越长,系统输入的太阳能也就越多。而地理纬度越低,太能高度角越大,太阳能辐射强度越大;

3)分布式光伏电力为清洁能源,因此考虑发电系统对自然环境的危害程度,在文[13]的基础上,以光伏发电系统 CO₂ 排放强度来反映;

4)在文[14]的基础上,笔者考虑分布式光伏参数这一指标,该指标表示光伏电能的分布性,即用观测点数目来表示。实际上,这是一个虚拟指标,仅表示考虑了分布式这一特征。在获取数据时,共取得了8个观测点数据;

5)逆变器的功率比较大,在高负荷供电时,可以保持在90%以上。但是在低负荷供电时,其工作效率受到很大影响,所以逆变器是影响光伏发电效率

的一个重要组件^[19]。在太阳能光伏发电系统中,有一个用于最大功率峰值跟踪的一个设备称为运算器,逆变器通过运算器和光伏阵列联系起来,可以提高逆变器的工作效率,促进能量转化。

基于以上分析,文中建立了如下指标体系。这些指标体系分成3类,一类是输入型指标,如分布式光伏参数、日照时数、地理经度和纬度、光伏电池性能和倾角调整率等,另一类是过程型指标,如 SVC 容量、储能器容量、逆变器整机效率、运算器整机效率等,还有一类是输出型指标,如光伏系统 CO₂ 排放强度、电压闪变、电压偏差、三相不平衡、供电可靠性、电压谐波、电压波动、电压暂降等。根据这些分析,文中所建立的递阶层次结构的指标体系见图1。

3 改进熵权法

3.1 熵权法的基本原理

熵(entropy)的概念最初产生于热力学,用于描述运动过程中的一个不可逆现象。后来,学者们将其引入到信息理论中,用熵来描述系统状态的不确定性。信息熵是系统信息不足或混沌无序的度量^[21],可用来度量获取的数据中包含的有用信息量,从而确定该信息所占的权重,由此形成熵权。熵权法的基本步骤是:

1)在一个具有 m 个评价方案, n 个评价指标的评估体系中,将指标的原始数据形成二维关系矩

目标层 分布式光伏电能质量评估																
输出型指标层								过程型指标层				输入型指标层				
光伏系统 CO ₂ 排放 强度	电压闪变	电压偏差	三相不平衡	供电可靠性	频率偏差	电压谐波	电压暂降	SVC容量	储能容量	逆变器效率	运算器效率	分布式参数	地理纬度	倾角调整率	光伏转换效率	日照时数

图 1 分布式光伏发电质量评估指标体系

Fig. 1 Quality assessment system of distributed photovoltaic power

阵,记为 $S=(a_{ij})_{m \times n}$

$$S = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2)对指标进行归一化处理,将步骤 1)所得的关系矩阵 S ,转化为标准矩阵,记为

$$z=(b_{ij})_{m \times n}$$

3)依据标准矩阵,求第 i 个方案的第 j 个指标的特征权重,其中 $0 < f_{ij} < 1$

$$f_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^m b_{ij} \quad (2)$$

4)得到第 j 个指标的熵值为

$$H_j = -\frac{1}{\log_{m-1}(m)} \sum_{i=1}^m f_{ij} \log_{m-1}(f_{ij}) \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

但是,当 $f_{ij}=0$ 时, $\log(f_{ij})$ 无意义,因此需要对 f_{ij} 加以修正^[22],定义为

$$f_{ij} = (1+b_{ij}) / \sum_{i=1}^m (1+b_{ij}) \quad (4)$$

5)第 j 个指标的熵权重为

$$d_j = \frac{1-H_j(x_j)}{m - \sum_{i=1}^m H_j(x_j)} \quad j=1,2,\dots,m \quad (5)$$

由此得到所有指标的熵权重向量为 $D=(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 。

3.2 改进熵权法

根据实际评估的需要,考虑到分布式光伏电能评估的特征,文中对传统熵权法进行以下两方面改进。

3.2.1 进行指标极化处理

在熵权法的第 2 步,需要对原始数据矩阵进行归一化处理,即将其统一为列向量和等于 1 的标准矩阵。但是笔者针对的分布式光伏电能质量评估数据很多,其性质差异很大。如果忽略这些差异,盲目进行标准化,使得不同性质的指标之间缺乏可比性,因而标准化也就失去了意义。

考虑到分布式光伏发电指标体系比较复杂,既有

传统电能质量指标,又有分布式光伏电能指标。既有正向指标,又有负向指标,还有中间指标。如电压暂降、逆变器效率、光伏电池转换效率属于正向指标,而电压波动、电压闪变属于负向指标,供电可靠性、地理纬度和倾角调整率则属于中性指标。基于这些分析,文中将这些指标统一做极化处理,即将这些指标统一为正向指标,按照以下 3 个公式进行极化处理。

$$R_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (\text{正向指标}); \quad (6)$$

$$R_{ij} = -\frac{x_{ij} - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (\text{负向指标}); \quad (7)$$

$$R_{ij} = \left| \frac{x_{ij} - \bar{x}}{x_{\max} - x_{\min}} \right| \quad (\text{中性指标}) \quad (8)$$

式(6)~(8)中: $x_{\max}$ 表示每一列的最大值; $x_{\min}$ 表示每一列的最小值; $\bar{x}$ 表示每一列的算术平均值。

3.2.2 采用改进 AHP 法和熵权法相结合求一级指标权重

对于 3 个一级指标而言,即输入型指标、过程型指标和输出型指标,这 3 个指标的原始数据难以获得,因此直接采用熵权法求权重,肯定行不通。为此,采用改进的层次分析 AHP 法首先进行赋权^[23],然后再采用熵权法进行修正,由此综合了 2 种方法的优点。

层析分析法是一种较为经典的主观赋权法,不需要原始数据。由专家根据自身经验,给出判断矩阵,然后再对判断矩阵进行运算得到权重。但是由于人为因素,在对大量指标进行判断时,很容易陷入自相矛盾。如全部比较结果以成对比较判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 表示。判断矩阵 A 的元素还应当满足: $a_{ij} a_{jk} = a_{ik}, \forall i, j, k=1, 2, \dots, n$ 。为此,必须求判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$, 进一步计算 $CR = CI/RI$ 。仅

当 $CR < 0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。所以层次分析法的计算量很大,考虑到文中的一级指标只有 3 个。于是对传统层次分析法进行改进,然后再采用熵权法进行修正。具体操作步骤如下:

1)传统的层析分析法,采用著名数学家 Saaty 等的建议,引用数字 1~9 及其倒数作为标度。文中采用三标度法,即若 A 与 B 同样重要用 1 表示,若 A 比 B 重要用 2 表示,若 A 没有 B 重要用 0 表示,形成初始判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。

2)令 $s_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad t=1, 2, \dots, n; s_k = \sum_{j=1}^n a_{kj}, k=1, 2, \dots, n$, 对初始判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 进行转化,得到新的判断矩阵 $U=(u_{ij})_{n \times n}$ 。新矩阵的元素之间满足下列关系

$$\begin{cases} u_{ij}=s_i-s_k+1 & s_i \geq s_k \\ u_{ij}=(s_k-s_i+1)^{-1} & s_i < s_k \end{cases} \quad (t=i, k=j)。(9)$$

3)然后计算出 $\bar{\omega}_j = \sqrt[n]{\sum_{i=1}^n u_{ij}}$, 得到权重

$$\omega_j = \bar{\omega}_j / \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_j。(10)$$

4)根据式(2)、(3),对判断矩阵 $U=(u_{ij})_{n \times n}$ 进行归一化处理,计算熵值和熵权重。

5)由此,可以得到综合权重

$$w_j = \omega_j d_j / \sum_{j=1}^n \omega_j d_j \quad j=1, 2, \dots, n。(11)$$

4 实例分析

4.1 数据来源

文中的输出型指标和过程型指标的数据,主要参考文[14]。而输入型数据,则主要参考文[19-20]。考虑了分布式光伏的 8 个观测点,收集得到的原始数据见表 3。

4.2 二级指标权重的确定

1)指标极化处理。对指标性质进行分析后发现,电压暂降、日照时数、SVC 容量、储能器容量、逆变器效率、运算器效率、光伏电池转换效率属于正向指标,而地理纬度、倾角调整率以及供电可靠性属于中性指标,其他指标则均属于负向指标。根据式(6)-(8),以输出型指标为例,极化处理后得到标准

$$S = \begin{bmatrix} 0.860 & 84 & 0.220 & 00 & 0.194 & 95 & 0.000 & 00 & 0.219 & 51 & 0.000 & 00 & 0.000 & 00 & 0.000 & 00 & 0.264 & 15 \\ 0.281 & 55 & 1.000 & 00 & 1.000 & 00 & 0.563 & 83 & 0.390 & 24 & 0.750 & 00 & 0.803 & 07 & 1.000 & 00 & 0.443 & 40 \\ 0.187 & 70 & 0.560 & 00 & 0.681 & 19 & 0.553 & 19 & 0.292 & 68 & 0.375 & 00 & 0.237 & 85 & 0.461 & 54 & 0.849 & 06 \\ 0.595 & 47 & 0.920 & 00 & 0.449 & 54 & 1.000 & 00 & 0.487 & 80 & 0.875 & 00 & 0.434 & 78 & 0.338 & 46 & 0.301 & 89 \\ 1.000 & 00 & 0.020 & 00 & 0.621 & 56 & 0.148 & 94 & 1.000 & 00 & 0.250 & 00 & 0.156 & 01 & 0.430 & 77 & 0.830 & 19 \\ 0.000 & 00 & 0.000 & 00 & 0.000 & 00 & 0.734 & 04 & 0.000 & 00 & 0.500 & 00 & 0.069 & 05 & 0.846 & 15 & 0.000 & 00 \\ 0.378 & 64 & 0.700 & 00 & 0.295 & 87 & 0.861 & 70 & 0.780 & 49 & 1.000 & 00 & 1.000 & 00 & 0.723 & 08 & 1.000 & 00 \\ 0.521 & 04 & 0.340 & 00 & 0.348 & 62 & 0.234 & 04 & 0.024 & 39 & 0.375 & 00 & 0.347 & 83 & 0.753 & 85 & 0.641 & 51 \end{bmatrix}。$$

表 3 分布式光伏电能质量原始数据

Table 3 Original data of distributed PV power quality

观测点	1	2	3	4	5	6	7	8
光伏系统 CO ₂ 排放强度/[kg·(MW·h) ⁻¹]	473	294	264	391	516	207	324	368
电压闪变/%	0.47	0.86	0.64	0.82	0.37	0.36	0.71	0.53
电压偏差/%	3.20	6.71	5.31	4.31	5.06	2.35	3.64	3.87
三相不平衡/%	0.82	1.35	1.34	1.76	0.96	1.51	1.63	1.04
供电可靠性/%	0.84	0.77	0.81	0.73	0.52	0.93	0.61	0.92
频率偏差/Hz	0.09	0.15	0.12	0.16	0.11	0.13	0.17	0.12
电压谐波/%	1.71	4.85	2.64	3.41	2.31	1.98	5.62	3.07
电压暂降/%	0.81	0.16	0.51	0.59	0.53	0.26	0.34	0.32
电压波动/%	1.34	1.53	1.96	1.38	1.94	1.06	2.12	1.74
储能装置容量/MW	52	19	34	26	36	40	27	29
电能质量治理装置 SVC 容量/Mvar	3.2	1.7	2.9	2.7	1.6	2.4	2.6	1.9
逆变器装置效率/%	0.92	0.71	0.82	0.75	0.50	0.93	0.71	0.83
运算器装置效率/%	0.82	0.77	0.84	0.73	0.62	0.83	0.61	0.91
日照时数/(h·a ⁻¹)	2 182.4	1 986.1	1 211.3	1 902.1	2 019.7	3 005.1	2 304.6	2 407.4
地理纬度	30°04'	31°09'	30°40'	30°20'	29°54'	29°43'	30°24'	30°15'
倾角调整率/(次·天 ⁻¹)	5.3	6.7	4.6	5.8	9.4	7.1	5.6	7.3
光伏电池转换效率/%	15.6	11.9	9.4	20.7	18.6	14.3	12.9	9.1
分布式光伏电源参数	是一个虚拟指标,即考虑 8 个观测点,它们是分布的。							

矩阵。

2)依据标准矩阵,求 i 个观测点的第 j 个指

标的特征权重。由于出现了矩阵元素等于 0 的情况,采用式(4)进行修正。修正后得到特征权重

$$F = \begin{bmatrix} 0.225 & 0.04 & 0.058 & 0.051 & 0.054 & 0.28 & 0.082 & 0.67 & 0.068 & 0.70 & 0.082 & 0.47 & 0.090 & 0.51 & 0.075 & 0.73 & 0.061 & 0.00 \\ 0.073 & 0.60 & 0.265 & 0.96 & 0.278 & 0.42 & 0.137 & 0.66 & 0.122 & 0.14 & 0.181 & 0.82 & 0.263 & 0.42 & 0.219 & 0.59 & 0.102 & 0.40 \\ 0.049 & 0.07 & 0.148 & 0.94 & 0.189 & 0.66 & 0.135 & 0.07 & 0.091 & 0.60 & 0.090 & 0.91 & 0.078 & 0.02 & 0.101 & 0.35 & 0.196 & 0.08 \\ 0.155 & 0.67 & 0.244 & 0.68 & 0.125 & 0.16 & 0.244 & 0.16 & 0.152 & 0.67 & 0.212 & 0.12 & 0.142 & 0.62 & 0.074 & 0.32 & 0.069 & 0.72 \\ 0.261 & 0.42 & 0.005 & 0.32 & 0.173 & 0.05 & 0.036 & 0.36 & 0.312 & 0.98 & 0.060 & 0.61 & 0.051 & 0.17 & 0.094 & 0.59 & 0.191 & 0.72 \\ 0.084 & 0.56 & 0.085 & 0.03 & 0.086 & 0.27 & 0.179 & 0.22 & 0.089 & 0.32 & 0.121 & 0.21 & 0.022 & 0.65 & 0.185 & 0.81 & 0.081 & 0.10 \\ 0.098 & 0.98 & 0.186 & 0.17 & 0.082 & 0.38 & 0.210 & 0.39 & 0.244 & 0.27 & 0.242 & 0.42 & 0.328 & 0.02 & 0.158 & 0.78 & 0.230 & 0.94 \\ 0.136 & 0.21 & 0.090 & 0.43 & 0.097 & 0.06 & 0.057 & 0.14 & 0.007 & 0.63 & 0.090 & 0.91 & 0.114 & 0.09 & 0.165 & 0.54 & 0.148 & 0.15 \end{bmatrix}。$$

矩阵。

3)根据式(3),计算得到每个指标的熵值。汇总这些熵值,得到输出型指标层的熵值向量为[0.973 937 346 0.920 495 15 0.979 367 0.968 456 0.917 325 0.985 774 0.912 179 0.999 91 0.986 255]。

4)根据式(5),计算得到每个指标的熵权值。汇总熵权值,得到输出型指标层熵权重向量为 $\omega_{out}=[0.073 \ 148 \ 066 \ 0.223 \ 140 \ 21 \ 0.057 \ 91 \ 0.088 \ 531 \ 0.232 \ 037 \ 0.039 \ 926 \ 0.246 \ 48 \ 0.000 \ 252 \ 0.038 \ 576]$ 。

同理,采用熵权法,可以求得过程型指标层和输入型指标层的熵权重向量为 $\omega_{process}=[0.233 \ 540 \ 77 \ 0.177 \ 912 \ 0.286 \ 539 \ 0.302 \ 001]$, $\omega_{inp}=[0.092 \ 827 \ 0.123 \ 641 \ 0.432 \ 658 \ 0.349 \ 874]$ 。

4.3 一级指标权重的确定

一级指标权重的确定思路是,首先采用改进AHP法求出初始权重,然后采用熵权法进行修正。

1)首先建立初始判断矩阵,进一步根据公式(9),得到

$$s=\{5,3,1\}, U=\begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 0.333 & 1 & 3 \\ 0.2 & 0.333 & 1 \end{pmatrix};$$

2)根据式(10)计算得到 $\omega=\{0.605 \ 381, 0.291 \ 48, 0.103 \ 139\}$;

3)对判断矩阵 $U=(u_{ij})_{n \times n}$ 进行归一化处理,得到新矩阵 $Z=(z_{ij})_{n \times n}$;

4)根据式(3),得到指标熵值为: $H=\{0.797 \ 551 \ 12, 0.719 \ 333, 0.852 \ 792 \ 49\}$;

5)根据式(10),得到第1个指标的熵权重为:0.321 182 51。同理得到其他指标的熵权重,于是得到熵权重向量 $d=\{0.321 \ 182 \ 51, 0.445 \ 274 \ 7, 0.233 \ 542 \ 792\}$

6)根据式(11),可以得到3个指标的综合性权重 $w=\{0.558 \ 149, 0.372 \ 71, 0.069 \ 14\}$ 。

4.4 综合性评价

设定评语集为{优秀,一般,合格}。对应分数集为 $g=\{5,3,1\}$ 。首先计算二级指标的评价值。以输出型指标为例,有 $g_{out}=\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \omega_j s_{ij}=\sum_{j=1}^9 \sum_{i=1}^8 \omega_j s_{ij}=3.515 \ 264 \ 573$ 。同理,可以得到过程型指标 $g_{pro}=2.341 \ 507$,输入型指标 $g_{inp}=2.341 \ 507$ 。

设 $Y=\{3.515 \ 264 \ 573, 2.341 \ 507, 1.698 \ 126\}$,又因为 $w=\{0.558 \ 149, 0.372 \ 71, 0.069 \ 14\}$ 。由此得到最

终评价值为: $g=\sum_{i=1}^3 w_i y_i=2.952 \ 136$ 。根据评价等级,该评估结果的值接近于3。因此,可以认为所评估的分布式光伏电能质量一般。

5 结论

全球分布式光伏发电出现了井喷式发展,中国、德国、美国、日本等国家均出台了相关政策支持分布式光伏发电产业的发展。分布式光伏具有广阔的发展前景,对分布式光伏电能质量评估也显得很有意义。

文中运用改进熵权法,对分布式光伏电能质量进行评估。研究得出结论:

1)从输入、过程和输出3个方面来建立指标体系,较为全面地反映了分布式光伏电能质量;

2)改进熵权法将指标分成正向、负向和中性3类,并进行极化处理,深入地体现了指标性质差异;

3)改进熵权法结合了层次分析AHP法,解决了缺乏实测数据时,如何合理确定权重这一难题;

4)改进熵权法能够充分利用原始数据来进行计算,能较为充分地利用实测的小样本数据,较好地体现“分布式”特征。

文中最后采用线性加权进行综合评价,未来还可以考虑采用模糊数学法进行评价,但是必须重点解决小样本数据下,如何确定隶属度的问题,这将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] CAMPOCCIA A, DUSONCHET L, TELARETTI E, et al. An analysis of feed-in tariffs for solar PV in six representative countries of the European Union[J]. Solar Energy, 2014 (107):530-542.
- [2] 赵 波, 张雪松, 洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8):95-100.
- ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2012, 32(8): 95-100.
- [3] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 一种考虑排序稳定分析的电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 70-76.
- LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A new method for power quality comprehensive evaluation considering the analysis of sequence stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 70-76.
- [4] 付学谦, 陈皓勇. 基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 128-132.
- FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on weighted rank sum ratio method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 128-132.
- [5] 欧阳森, 杨家豪, 石怡理. 基于竞争机制的电能质量动态评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 1-7.
- OUYANG Sen, YANG Jiahao, SHI Yili. Dynamic evaluation method of power quality based on the competitive mechanism[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(2): 1-7.
- [6] 刘颖英, 戴平, 徐永海, 等. 电能质量综合评估方法比较[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 93-97.
- LIU Yingying, DAI Ping, XU Yonghai, et al. Comparison of power quality comprehensive evaluation methods[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 93-97.
- [7] 袁金晶, 欧阳森, 石怡理, 等. 基于激励惩罚机制的区域电网电能质量综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 55-59.
- YUAN Jinjing, OUYANG Sen, SHI Yili, et al. Power quality comprehensive evaluation of regional power grid based on incentive and punishment mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 55-59.
- [8] 康世崑, 彭建春, 何禹清. 模糊层次分析与多目标决策相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 113-118.
- KANG Shiwei, PENG Jianchun, HE Yuqing. Comprehensive evaluation of power quality based on the integration of fuzzy analytic hierarchy process with multi-objective decision-making[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 113-118.
- [9] 德珑, 王克文, 杨平, 等. 基于聚类思想的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 105-111.
- DE Long, WANG Kewen, YANG Ping, et al. Power quality comprehensive evaluation based on the clustering method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 105-111.
- [10] 刘俊华, 罗隆福, 张志文, 等. 基于模糊集对分析法的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 81-85.
- LIU Junhua, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on fuzzy set pair analysis[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 81-85.
- [11] 周林, 栗秋华, 刘华勇, 等. 用模糊神经网络模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 66-69.
- ZHOU Lin, LI Qihua, LIU Huayong, et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 66-69.
- [12] 林德清, 顾伟, 王元凯, 等. 基于动态时间弯曲空间距离度量的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 562-567.
- LIN Deqing, GU Wei, WANG Yuankai, et al. Synthetic evaluation of power quality based on dynamic time warping spatial distance measurement[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 562-567.
- [13] 李海英, 闵建平. 兼顾分布式发电系统特征的电能质量评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 31-36.
- LI Haiying, MIN Jianping. Power quality assessment considering characteristics of distributed generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 31-36.
- [14] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4270-4276.
- FU Xueqian, CHEN Haoyong, LIU Guote, et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4270-4276.
- [15] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 基于突变决策的分布式发电系统电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 52-57.
- ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang. A catastrophe decision theory based power quality comprehensive evaluation method for distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(21): 52-57.
- [16] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- GUO Yajun. Comprehensive evaluation theory, methods and applications[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] 谢荣斌, 张登, 林福昌, 等. 基于关联规则与变权重的变压器状态评估方法[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 133-138.
- XIE Rongbin, ZHANG Deng, LIN Fuchang, et al. Transformer condition assessment using association rules and variable weight[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 133-138.
- [18] 崔杰, 党耀国, 刘思峰. 基于灰色关联度求解指标权重的改进方法[J]. 中国管理科学, 2008, 16(5): 141-145.
- CUI Jie, DANG Yaoguo, LIU Sifeng. An improved approach for determining weights of attributes in decision making based on grey incidence[J]. Chinese Journal of Management Science, 2008, 16(5): 141-145.
- [19] 张雪莉, 刘其辉, 马会萌, 等. 光伏电站输出功率影响因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(5): 75-81.
- ZHANG Xueli, LIU Qihui, MA Huimeng, et al. Factor analysis of PV plant output power[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2012, 28(5): 75-81.

- CHEN Yu. Research on a stand-alone PV system with ultracapacitor as energy storage device[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2011, 27(8): 74-76.
- [10] RUFER A, HOTELLIER D, BARRADE P. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 629-636.
- [11] 姜季宏, 刘鸿鹏, 江振洲, 等. 储能电梯中超级电容选取和控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(4): 610-615.
- JIANG Jihong, LIU Hongpeng, JIANG Zhenzhou, et al. Supercapacitor selection and control strategy of energy storage elevator[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(4): 610-615.
- [12] TEYMOURFAR R, ASAEI B, IMAN-EINI H, et al. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line[J]. Energy Conversion and Management, 2012(56): 206-214.
- [13] 邓欢欢, 张丹丹. 串联超级电容器组开关电感通断法均衡研究[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 64-68.
- DENG Huanhuan, ZHANG Dandan. Study on series supercapacitor group switching inductive method balancing test[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 64-68.
- [14] 孙家南, 赵洋, 韦莉, 等. 基于系统辨识的电化学超级电容器建模[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 16-21.
- SUN Jianan, ZHAO Yang, WEI Li, et al. Modeling of electrochemical supercapacitor based on system identification[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 16-21.
- [15] BULLER S, KARDEN E, KOK D, et al. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1622-1626.
- [16] KIM S, CHOI W. A method for performance evaluation and optimal sizing of the supercapacitor module by the electrochemical impedance spectroscopy[C]//31st International Telecommunications Energy Conference. Incheon, Korea: [s.n.], 2009: 1-6.
- [17] TIRONI E, MUSOLINO V. Supercapacitor characterization in power electronic applications: proposal of a new model[C]//2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy: [s.n.], 2009: 367-373.
- [18] DU Lingling. Study on supercapacitor equivalent circuit model for power electronics applications[C]//2009 2nd Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. Shenzhen, China: [s.n.], 2009: 51-54.
- [19] 赵洋, 张逸成, 孙家南, 等. 混合型水系超级电容器建模及其参数辨识[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 186-191.
- ZHAO Yang, ZHANG Yicheng, SUN Jianan, et al. Modeling of hybrid supercapacitor with aqueous electrolyte and its parameter identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 186-191.
- [20] SPYKER R L, NELMS R M. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 829-836.
- [21] TECHNOLOGIES M. BOOSTCAP energy storage modules life duration estimation[S]. America: Maxwell Technologies, 2007.
- [22] 萧德云. 系统辨识理论及应用[M]. 清华大学出版社, 2014.
- XIAO Deyun. Theory of system identification with applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- 赵洋(1981—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为新能源发电技术与应用、超级电容储能系统性能分析、系统辨识与智能优化算法。

(上接第198页)

- [20] 尚华, 王惠荣. 太阳能光伏发电效率的影响因素[J]. 宁夏电力, 2010(5): 48-50.
- SHANG Hua, WANG Huirong. Analysis on the factors affecting the efficiency of solar energy photovoltaic power Generation[J]. Ningxia Electric Power, 2010(5): 48-50.
- [21] 林振智, 文福拴, 周浩. 熵权决策理论及其在黑启动决策中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 26-33.
- LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, ZHOU Hao. Entropy weight based decision-making theory and its application to black-start decision-making[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 26-33.
- [22] 杨锡运, 刘欢, 张彬, 等. 基于熵权法的光伏输出功率组合预测模型[J]. 太阳能学报, 2014, 35(5): 744-749.
- YANG Xiyun, LIU Huan, ZHANG Bin, et al. A combination method for photovoltaic power forecasting based on entropy weight method[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(5): 744-749.
- [23] 姜启源. 层次分析法中的若干问题[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(23): 156-168.
- JIANG Qiyuan. Some issues on analytic hierarchy process[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2013, 43(23): 156-168.
- 马春艳(1980—), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及其自动化、电力系统可靠性分析。
- 刘惠康(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制、电力系统保护与控制等。
- 龚瑛(1981—), 女, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及其自动化。