兼顾分布式发电系统特征的电能质量评估

李海英,闵建平
(上海理工大学 电气工程系,上海 200093)

摘要:为确保按质定价市场环境下分布式发电系统的竞争力和建设积极性,将 CO_2 排放强度量化并纳入电能质量综合评估指标中。提出一种基于集对分析原理的评估方法,引入联系度并采用隶属度函数从同、异、反三方面描述电能质量指标与状态等级的不确定性。采用层次分析法确定权重,并结合置信度准则和评分准则进行电能质量有序分割类不同状态等级及同一质量等级优劣性的属性识别。算例表明,所提出的评估方法显著提高了评估结果的合理性和精细性。

关键词:电能质量;评估;分布式发电;碳排放强度;集对分析;置信度准则;评分准则
中图分类号:TM 732 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.006

0 引言

节能减排、低碳调度以及大规模互联电网暴露出来的脆弱性,这些因素共同激发了电力系统中分布式发电的高密度和高渗透率[1-2]。分布式发电资源的深度融合产生了一系列电能质量问题,如大量电力电子器件的应用引发谐波谐振;间歇式电源有功功率输出波动导致电压瞬变或闪变;风电场感应式异步发电机并网伴随的冲击电流造成电压跌落;单相分布式电源增加三相电压不平衡;同步机式的电源加剧频率偏差[3]。电能质量评估可为多功能并网逆变器提供控制决策[4],并能有效激励发电、输电、配电各方对电能质量治理的主动性。

目前,电能质量评估集中于评估方法的研究和评估指标的选取。评估方法主要建立在模糊数学[5-6]、概率统计[7]及人工智能[8-9]基础上。模糊理论简单,计算量小,借助专家知识即可进行决策,适用于历史数据缺乏、对评估结果精度要求不太严格的情况,灰关联等信息融合方法及模糊聚类等数据挖掘方法[10-11]具有相同性质;概率统计方法通过确定一系列不同时刻指标值的概率分布实现各指标多组数据的集中处理,适用于某时段(如日周期和月周期等)电能质量的快速评估;人工智能算法基于大样本数据,误差较小、精度较高,但数学模型复杂,扩展具有一定的局限性,不适宜对大量评估对象进行统一评估。针对电能质量评估指标的不确定性,文献[12]引入集对分析模型,从同、异、反三方面描述,但差异度系数的取值(范围在[-1,1]之间)影响评估结果。在电能质量评估指标方面,正如电能质量至今没有统一的定义一样,其评估指标的选取由于供需立场的不同也呈现多样性,但上述文献采用的电能质量评估指标,无论是技术性还是非技术性,都是基于确保敏感设备正常工作。随着分布式发电资源份额的增加,其电能质量评估也提上日程,以现有指标体系对传统能源和清洁能源在同一平台进行评估呈现不足。

一方面,优质电能已不再局限于确保供电的安全性,传统能源带来的环境污染问题已成为制约国家能源可持续发展战略的一大障碍,其所带来的损失远超过设备不正常工作造成的经济损失,电能质量评估应从社会福利最大化的角度出发,充分考虑电力生产对生态环境的影响。另一方面,传统能源电能质量的污染主要源自非线性、冲击性、不平衡特征及谐波丰富的负荷,而分布式发电系统自身的间歇性、大量电力电子器件的应用都使电能质量进一步恶化,在未来按质定价的电力市场环境下,目前的评估指标会使其处于劣势地位。而碳评估指标的引入将显著提高清洁能源的电能质量序位,从而确保清洁能源的市场竞争力和建设积极性。因此在电能质量评估中考虑碳或等价碳[13]排放强度指标极为重要。

为全面、合理地对传统能源和清洁能源的电能质量进行评估,本文首先将 CO_2 及等价 CO_2 排放强度量化并将其考虑到电能质量的评估中去,以适应并促进低碳经济的发展;然后提出一种基于集对分析原理的评估方法,该方法定义的联系度函数在处理模糊、信息不完全导致的不确定性问题上有很大优势;最后引入置信度准则和评分准则进行电能质量有序分割类的属性识别,不仅能识别不同属性等级,且对处于同一质量等级的优劣性也能精确识别。

1 电能质量评估指标的选定与分级

电能质量指标分为技术性指标和非技术性指

收稿日期:2013-04-20;**修回日期**:2013-12-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207092);上海市教育委员会科研创新项目(12YZ099)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207092) and Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission(12YZ099)

标[14]。技术性指标主要指国家标准的电能质量指标，包括供电电压允许偏差(x_1)、电压波动(x_2)、闪变(x_3)、公用电网谐波畸变率(x_4)、三相电压允许不平衡度(x_5)、电力系统频率允许偏差(x_6)；非技术性指标主要考虑供电可靠性和用户满意度。离散或连续指标值的计算参见文献[15]。在低碳经济催生分布式发电资源高渗透率的背景下，现有指标已不足以反映电能质量的所有特征，故提出将 CO_2 或等价 CO_2 排放强度(x_7)(kg/(MW·h))作为非技术性指标纳入电能质量评估。考虑到我国目前3个或2个"9"供电可靠性承诺，且为较长时期的统计数据，其他非技术指标不适合用在电能质量的实时评估中，本文暂不予以考虑。上述7项指标构成了本文的电能质量指标集。

x_1—x_6 是以国家标准值为基准，各项指标偏离值与国家标准比值的百分比(x_i%)为衡量值。本文将电能质量各单项指标分为5级，即质量优(Ⅰ级)、良(Ⅱ级)、合格(Ⅲ级)、污染(Ⅳ级)、差(Ⅴ级)，分别记为 g_1、g_2、g_3、g_4、g_5。指标 x_1—x_6 的等级区间参考文献[16]，将9个等级合并为5个，以 x_1 为例，$g_1 \in [0,6]$，$g_2 \in (6,8]$，$g_3 \in (8,10]$，$g_4 \in (10,18]$，$g_5 \in (18,+\infty)$，其余指标区间依此类推。

指标 CO_2 排放存在2种计量方式：一种是以年、日、小时内的平均浓度(mg/m³)为计量单位；另一种是以单位时间排放量(t/a 或 g/h)为计量单位。为了进一步体现单位发电量所排放的 CO_2 水平，即 CO_2 排放强度，参考文献[17]，利用公式 $C_i = m_i / W_n$ 实现单位时间排放量与排放强度的转换，其中，m_i 为第 i 种污染物的排放量(g/h)；W_n 为机组供电量(kW)；C_i 为排放强度(g/(kW·h)或 lb/Btu(英制单位))。本文采用排放强度为计量方式，单位是 kg/(MW·h)。

CO_2 排放等级区间的设计参照文献[1]及各国减排新规。分布式发电系统，如风力、光伏发电等的 CO_2 排放水平为0~220 kg/(MW·h)，因此设定 $g_1 \in [0,220]$；美国环境保护署2012年3月27日首次对美国未来新建的发电厂提议设定 CO_2 排放标准，即新建的发电厂只允许每 MW·h 排放1 000磅(约合453.6 kg)CO_2，以鼓励建设天然气发电等更加清洁的发电，由于燃气涡轮机的 CO_2 排放强度为370~450 kg/(MW·h)，故设 $g_2 \in (220,370]$，$g_3 \in (370,450]$；而燃煤所排放的 CO_2 已经造成环境污染，故设 $g_4 \in (450,830]$，$g_5 \in (830,+\infty)$。

为了充分体现分布式发电系统的减排效益，文献[13]针对多种污染气体情况，按式(1)将 SO_2 和 NO_x 折算成等价 CO_2 排放浓度。

$$C_{CO_{2e}} = C_{CO_2} + 700C_{SO_2} + 1\,000C_{NO_x} \tag{1}$$

其中，$C_{CO_{2e}}$ 为折算后的等价 CO_2 排放浓度(kg/m³)；C_{CO_2}、C_{SO_2}、C_{NO_x} 分别为单位发电量 CO_2、SO_2、NO_x 的排放浓度(kg/m³)。考虑到低碳经济时代，分布式发电系统大规模发展的主要驱动力仍然是减少碳排放，因此文中非服务性指标限值仅参照 CO_2 排放标准。

2 基于隶属度函数的集对分析方法

2.1 集对分析原理

集对分析[18]的基本思想是在充分考虑被研究事物不确定性存在的前提下将确定性与不确定性作为一个系统从同、异、反三方面进行描述。集对分析方法采用联系度来描述系统中确定性与不确定性的相互共存和一定条件下的相互转化，而不是一定要将不确定性转化为确定性。

给定2个集合 A 与 B，其组成集对 $H=(A,B)$，集对分析方法的关键是建立2个集合 A 与 B 的联系度，联系度通常从同一度、差异度、对立度3个方面体现，表示为：

$$u_H = a + bi + cj \tag{2}$$

其中，a、b、c 分别为所讨论2个集合在指定问题背景下的同一度、差异度和对立度。同一度为两集合共同特性的定量刻画，对立度为两集合相反特性的定量刻画，介入二者之间的不确定性部分用差异度度量。i 和 j 有双层含义，一是作为差异度 b 和对立度 c 的系数，i 在[-1,1]区间取值，j 取值为-1，由于 i 的不确定性，联系度仍呈现既确定又不确定的状态；二是不考虑 i 和 j 的取值情况，仅起标记的作用，本文采用第2个含义，从而不存在 i 取值影响评估结果的问题。a、b、c 作为整体事件的3个部分，满足：

$$a + b + c = 1 \tag{3}$$

多元联系度可以充分考虑不确定性因素的影响，通过对差异度 b 扩展得到 Z 元联系度表达式：

$$u_H = a + \sum_{z=1}^{Z-2} b_z i_z + cj \tag{4}$$

其中，b_z 为差异度的多元细分，本文将差异度分为3级。同、异、反系数 a、b、c 采用模糊隶属度函数确定。

2.2 集对分析应用于电能质量评估

集对分析方法的核心是联系度，其确定方式比较灵活。文献[12]采用了图1所示框架。

在计算指标集合 Q 与状态等级 G 之间联系度时，首先根据指标集合 Q 中所有元素，确定其与4个状态等级 g_1、g_2、g_3、g_4 的同一度、差异度和对立度，由于 i_k 被看作系数，有具体取值，故 a_k、b_k、c_k、i_k 共同决定了联系度 $u_{(Q,g_k)}$。在确定系数 i_k 时，根据每一个指标值 x_r 所处的区间，再次从同异反三方面考虑与其等级 g_k 的联系度 $u_{(x_r,g_k)}$，得到每一等级的联系度 $u_{(Q,g_1)}$、

$u_{(Q,g_2)}$、$u_{(Q,g_3)}$、$u_{(Q,g_4)}$,最后将 $i=0$、$j=-1$ 代入,得到 4 个联系度的确定值,其中联系度最大的等级即为电能质量所在等级。但是,i_k 取值的随机性会对评估结果产生影响,为此本文采用了图 2 所示的集对分析模型。

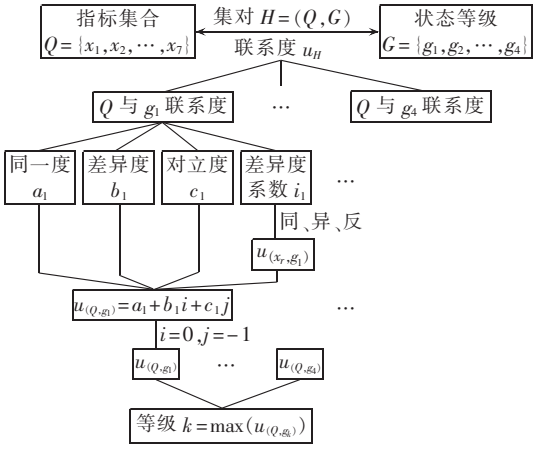

图 1 集对分析框架(a)

Fig.1 Set pair analysis framework(a)

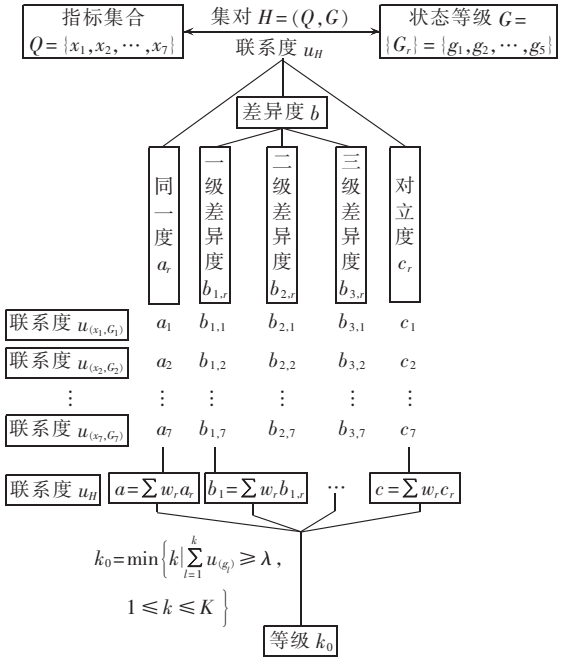

图 2 集对分析框架(b)

Fig.2 Set pair analysis framework(b)

图 2 与图 1 思路不同,确定电能质量等级时,首先根据指标集合 Q 中每一元素 x_r,确定与其状态等级的同一度 a_r、差异度 $b_{z,r}$、对立度 c_r(本文 7 个指标需计算 7 个联系度),再结合每一指标的权重 w_r,得到指标集合 Q 与状态等级 G 的联系度。

下面给出主要步骤。

a. 建立集对。根据第 1 节,将电能质量指标体系实测值 $Q=\{x_1,x_2,\cdots,x_7\}$ 及各指标对应的状态等级 $\{G_r\}=\{g_1,g_2,\cdots,g_5\}$($r=1,2,\cdots,7$)构成集对,用于分析指标集合中每一采样元素与该指标状态等级的联系度。

b. 确定各指标实测值与其状态等级的多元联系度。由式(4)得到电能质量各单项指标 x_r 与相应状态等级的 5 元联系度:

$$u_{(x_r,G_r)}=a_r+b_{1,r}i_1+b_{2,r}i_2+b_{3,r}i_3+c_rj \tag{5}$$

式中对指标 x_r 状态等级构成的整体区间用同一度、差异度、对立度来标注并赋予实际意义,即认为优等级区间为同一度区间,差等级区间为对立度区间(因为两区间数据值相差较远),介于优和差等级范围内的为差异度区间。a_r 定义为指标 x_r 属于优质等级的程度;$b_{z,r}$ 为指标 x_r 属于 z 级差异度的程度,$z=1,2,3$;c_r 为指标 x_r 属于差等级的程度。上述系数通过隶属度函数确定,各指标采样值与其等级的隶属度函数见图 3。图中,$0<s_1<s_2<s_3<s_4$,为各状态等级的阈值,例如对于指标 x_7,$s_1=220$,$s_2=370$,$s_3=450$,$s_4=830$。各指标状态等级与区间阈值的对应关系如表 1 所示。

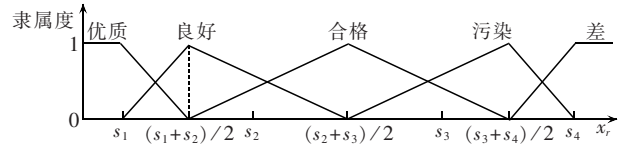

图 3 三角形隶属度函数图

Fig.3 Diagram of triangular membership function

表 1 状态等级与区间阈值的对应关系

Tab.1 Corresponding relationship between state level and interval threshold

等级	阈值	等级	阈值
g_1	$[0,s_1]$	g_4	$(s_3,s_4]$
g_2	$(s_1,s_2]$	g_5	$(s_4,+\infty)$
g_3	$(s_2,s_3]$		

a_r、$b_{z,r}$、c_r 由图 3 求得($b_{2,r}$ 和 $b_{3,r}$ 与 $b_{1,r}$ 类似),表达式如式(6)—(8)所示,代入式(5)得到多元联系度表达式如式(9)所示。

$$a_r=\begin{cases}1 & x_r\leqslant s_1\\ \dfrac{s_1+s_2-2x_r}{s_2-s_1} & s_1<x_r\leqslant\dfrac{s_1+s_2}{2}\\ 0 & x_r>\dfrac{s_1+s_2}{2}\end{cases} \tag{6}$$

$$b_{1,r}=\begin{cases}0 & x_r\leqslant s_1,x_r>\dfrac{s_2+s_3}{2}\\ \dfrac{2x_r-2s_1}{s_2-s_1} & s_1<x_r\leqslant\dfrac{s_1+s_2}{2}\\ \dfrac{s_2+s_3-2x_r}{s_3-s_1} & \dfrac{s_1+s_2}{2}<x_r\leqslant\dfrac{s_2+s_3}{2}\end{cases} \tag{7}$$

$$c_r=\begin{cases}0 & x_r\leqslant\dfrac{s_3+s_4}{2}\\ \dfrac{2x_r-s_3-s_4}{s_4-s_3} & \dfrac{s_3+s_4}{2}<x_r\leqslant s_4\\ 1 & x_r>s_4\end{cases} \tag{8}$$

$$u_{(x_r,G_r)}=\begin{cases}1+0i_1+0i_2+0i_3+0j & x_r\leqslant s_1\\ \dfrac{s_1+s_2-2x_r}{s_2-s_1}+\dfrac{2x_r-2s_1}{s_2-s_1}i_1+0i_2+0i_3+0j & s_1<x_r\leqslant\dfrac{s_1+s_2}{2}\\ 0+\dfrac{s_2+s_3-2x_r}{s_3-s_1}i_1+\dfrac{2x_r-s_1-s_2}{s_3-s_1}i_2+0i_3+0j & \dfrac{s_1+s_2}{2}<x_r\leqslant\dfrac{s_2+s_3}{2}\\ 0+0i_1+\dfrac{s_3+s_4-2x_r}{s_4-s_2}i_2+\dfrac{2x_r-s_2-s_3}{s_4-s_2}i_3+0j & \dfrac{s_2+s_3}{2}<x_r\leqslant\dfrac{s_3+s_4}{2}\\ 0+0i_1+0i_2+\dfrac{2s_4-2x_r}{s_4-s_3}i_3+\dfrac{2x_r-s_3-s_4}{s_4-s_3}j & \dfrac{s_3+s_4}{2}<x_r\leqslant s_4\\ 0+0i_1+0i_2+0i_3+1j & x_r>s_4\end{cases}\tag{9}$$

以指标 x_7 为例，假设实测值 x_7=450 kg/(MW·h)，根据其区间阈值 s_1—s_4，可知$(s_2+s_3)/2<x_7<(s_3+s_4)/2$，代入式(9)得 $u_{(x_7,G_7)}=0+0i_1+0.826\,1i_2+0.173\,9i_3+0j$，其中 $a_7=0$，$b_{1,7}=0$，$b_{2,7}=0.826\,1$，$b_{3,7}=0.173\,9$，$c_7=0$。

c. 结合权重，确定集对 $H=(Q,G)$的联系度：

$$u_H=\sum_{r=1}^{7}w_r u_{(x_r,G_r)}=\sum_{r=1}^{7}w_r a_r+\sum_{r=1}^{7}w_r b_{1,r}i_1+\sum_{r=1}^{7}w_r b_{2,r}i_2+\sum_{r=1}^{7}w_r b_{3,r}i_3+\sum_{r=1}^{7}w_r c_r j=a+b_1i_1+b_2i_2+b_3i_3+cj\tag{10}$$

其中，w_r 为指标 x_r 的权重，具体见第3节。

d. 确定电能质量等级。据式(11)得某时段电能质量等级，式(14)可比较同等级电能质量优劣状况。

3 指标权重确定

采用改进层次分析法[19]确定电能质量指标的权重。用三标度法构建判断矩阵求主观权重，改进的三标度法仅含2(M 因素比 N 因素重要)、1(M 因素与 N 因素同等重要)和0(M 因素没有 N 因素重要)3个标度值，易比较且无需一致性校验。步骤如下。

a. 建立比较矩阵。依据专家经验，设各项指标重要度依次为谐波>三相不平衡度>电压允许偏差>闪变>电压波动>频率允许偏差>CO_2 排放强度，即 $x_4>x_5>x_1>x_3>x_2>x_6>x_7$，比较矩阵见表2。

表2 比较矩阵

Tab.2 Comparative matrix

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
x_1	1	2	2	0	0	2	2
x_2	0	1	0	0	0	2	2
x_3	0	2	1	0	0	2	2
x_4	2	2	2	1	2	2	2
x_5	2	2	2	0	1	2	2
x_6	0	0	0	0	0	1	2
x_7	0	0	0	0	0	0	1

b. 计算重要性排序指数并构建评判矩阵。

c. 求评判矩阵的最优传递矩阵和拟优一致矩阵，拟优一致矩阵的最大特征值对应的特征向量并归一化处理后即可得到各指标的权重。本文计算权重时分2种情况：只考虑国家标准中的6项指标，计算权重$\{w_1,w_2,w_3,w_4,w_5,w_6\}=\{0.138\,5,0.038\,4,0.072\,4,0.467\,9,0.261\,3,0.021\,4\}$；考虑7项指标时的权重$\{w_1,w_2,w_3,w_4,w_5,w_6,w_7\}=\{0.144\,9,0.044\,4,0.080\,2,0.433\,7,0.257\,0,0.025\,0,0.014\,8\}$。

4 电能质量状态等级判别方法

引入2种判别[20]方法：置信度准则和评分准则。置信度准则主要用于有序分割类中。以 $Q=\{$电能质量指标全体$\}$为例的对象空间中，$G=\{$质量等级水平$\}$称为空间 Q 的一个属性集，$G=\{g_1,g_2,\cdots,g_5\}$，5个不相交的质量等级子集构成了属性集 G 的分割，对全部子集 g_r 建立强或弱的顺序，本文认为电能质量越“优”越“好”，即 $g_1>g_2>\cdots>g_5$，称 g_1—g_5 为属性集 G 的有序分割类。若已知一组数据的联系度或状态测度，可采用置信度准则判别该组数据属于哪个类别。

置信度准则存在2种判别情况：一种是状态等级由高到低，即 $g_1>g_2>\cdots>g_K$(本文 $K=5$)，状态等级 k_0 的判定采用式(11)；另一种是状态等级由低到高，即 $g_1<g_2<\cdots<g_K$，根据式(12)判定。

$$k_0=\min\left\{k\,|\sum_{l=1}^{k}u_{(g_l)}\geqslant\lambda,1\leqslant k\leqslant K\right\}\tag{11}$$

$$k_0=\max\left\{k\,|\sum_{l=k}^{K}u_{(g_l)}\geqslant\lambda,1\leqslant k\leqslant K\right\}\tag{12}$$

其中，$u_{(g_l)}(l=1,2,\cdots,K)$分别对应图2中 a、b_1、b_2、b_3、c；λ 为置信度水平，区间设为[0.5,0.7]，本文取 $\lambda=0.7$。

评分准则是对2组同等级数据的优劣性进行比较，指在同一个问题背景下，已知 Q_1、Q_2 的属性测度 $u_{Q_1(g_k)}$与 $u_{Q_2(g_k)}(k=1,2,\cdots,K)$，且满足式(13)。假设属性集 g_k 的分数为 n_k，在 $g_1>g_2>\cdots>g_K$ 时，有 $n_1>n_2>\cdots>n_K$，取 $n_k=K+1-k$；反之 $n_k=k$。式(14)为 Q_f (f=1,2)的分数，若 $q_{Q_1}>q_{Q_2}$，则认为 Q_1 优于 Q_2。

$$\sum_{k=1}^{K}u_{Q_1(g_k)}=\sum_{k=1}^{K}u_{Q_2(g_k)}=1\tag{13}$$

$$q_{Q_f}=\sum_{k=1}^{K}n_k u_{Q_f(g_k)}\tag{14}$$

5 实例研究

参照文献[16]设定3组电能质量指标测试数据 Q_{11}、Q_{12}、Q_2，见表3，其中 Q_{11} 选用国家标准的6项指标作为指标集，Q_{12} 和 Q_2 基于本文的7项指标集，x_1—x_6 对应数据为标幺值。

3组测试数据与电能质量的5个等级(Ⅰ—Ⅴ

表 3 电能质量指标测试数据

Tab.3 Test data of power quality index

指标集	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7/[kg·(MW·h)$^{-1}$]
Q_{11}	8.72	0.085	0.017	1.157	1.655	0.03	—
Q_{12}	8.72	0.085	0.017	1.157	1.655	0.03	450
Q_2	6.50	0.600	0.270	1.800	1.600	0.06	250

级)分别构成集对。按照第 2.2 节的计算步骤,根据各指标的实测值、各指标等级的阈值及第 3 节的指标权重,可得电能质量联系度。以集合 Q_2 与电能质量等级的联系度计算为例,指标实测值 $x_1=6.5$,其等级区间阈值 $s_1=6$,$s_2=8$,$s_3=10$,$s_4=18$,且 $s_1<x_1<(s_1+s_2)/2$,由式(9)得联系度 $u_{(x_1,G_1)}=0.5+0.5i_1+0i_2+0i_3+0j$,同理可得 $u_{(x_2,G_2)}=1+0i_1+0i_2+0i_3+0j$,$u_{(x_3,G_3)}=1+0i_1+0i_2+0i_3+0j$,$u_{(x_4,G_4)}=0+0i_1+1i_2+0i_3+0j$,$u_{(x_5,G_5)}=0+0.5i_1+0.5i_2+0i_3+0j$,$u_{(x_6,G_6)}=1+0i_1+0i_2+0i_3+0j$,$u_{(x_7,G_7)}=0.6+0.4i_1+0i_2+0i_3+0j$,结合权重$\{w_1,w_2,w_3,w_4,w_5,w_6,w_7\}=\{0.144\,9,0.044\,4,0.080\,2,0.433\,7,0.257\,0,0.025\,0,0.014\,8\}$及式(10)可得联系度 $u_{Q_2}=0.231\,0+0.206\,8i_1+0.562\,2i_2+0i_3+0j$。同理 Q_{11}、Q_{12} 的联系度见表 4。

表 4 Q_{11}、Q_{12} 的联系度

Tab.4 Connection degrees of Q_{11} and Q_{12}

联系度	a_r	$b_{1,r}$	$b_{2,r}$	$b_{3,r}$	c_r
$u_{(x_1,G_1)}$	0	0.14	0.86	0	0
$u_{(x_2,G_2)}$	1	0	0	0	0
$u_{(x_3,G_3)}$	1	0	0	0	0
$u_{(x_4,G_4)}$	1	0	0	0	0
$u_{(x_5,G_5)}$	0	0.362 5	0.637 5	0	0
$u_{(x_6,G_6)}$	1	0	0	0	0
$u_{(x_7,G_7)}$	0	0	0.826 1	0.173 9	0
$u_{Q_{11}}$	0.600 1	0.114 1	0.285 8	0	0
$u_{Q_{12}}$	0.583 3	0.113 5	0.300 6	0.002 6	0

由置信度准则及评分准则分析电能质量等级。

a. CO_2 排放强度对电能质量的影响。Q_{11} 和 Q_{12} 前面 6 项指标值相同,对指标集 Q_{11},根据式(11),$u_{(g_1)}+u_{(g_2)}=0.714\,2>0.7$,判断电能质量等级为Ⅱ级,良好状态。指标集 Q_{12},$u_{(g_1)}+u_{(g_2)}<0.7$,$u_{(g_1)}+u_{(g_2)}+u_{(g_3)}=0.997\,4>0.7$,故电能质量等级为Ⅲ级,即合格状态。原因是 Q_{12} 中 CO_2 实测值处于合格与不合格分界线上,在一定程度上恶化了总体电能质量水平。因此该指标的纳入,在一定程度上能够改变电能质量的序位,确保清洁能源在未来市场环境下的竞争力。

b. 最大属性测度与置信度准则对评估结果的影响。以 Q_2 和 Q_{12} 为例进行分析,Q_2 如果按最大属性测度准则来判别,$u_{Q_2}=0.231\,0+0.206\,8i_1+0.562\,2i_2+0i_3+0j$ 中数值最大的是第 3 项,则判为Ⅲ级,与置信度准则判别结果相同。但对于 Q_{12},其联系度 $u_{Q_{12}}=0.583\,3+0.113\,5i_1+0.300\,6i_2+0.002\,6i_3+0j$,依据最大属性测度为Ⅰ级,与 **a** 中判定结果Ⅲ级有差异,这是因为虽然 0.583 3 最大,但指标集处于良、合格、轻度污染的程度占整体等级将近一半,因此单凭数值最大来判定等级具有极端性,置信度准则的判断结果更能反映实际情况。

c. 同一等级电能质量优劣比较。Q_{12} 和 Q_2 同处于Ⅲ级,合格,但 $q_{Q_{12}}=5\times0.583\,3+4\times0.113\,5+3\times0.300\,6+2\times0.002\,6=4.277\,5>q_{Q_2}=5\times0.231\,0+4\times0.206\,8+3\times0.562\,2=3.668\,8$,说明 Q_{12} 实测值反映的电能质量水平要高于 Q_2。评分准则可对多个处于同一电能质量等级的对象进行优劣性区分。

6　结论

a. 将 CO_2 及等价 CO_2 排放强度量化并将其考虑到电能质量的评估中去,其可改变电能质量序位,确保了按质定价市场环境下分布式资源的竞争力,为各类发电资源电能质量评估提供支持。

b. 提出的基于集对分析原理的评估方法,其定义的联系度在处理模糊、信息不完全所导致的不确定性问题上具有很大的优势,且简单直观。

c. 采用的置信度准则能综合考虑各等级的属性测度,在有序分割空间上确定电能质量等级更合理;引入的评分准则能有效比较同等级电能质量水平的优劣程度,便于电能质量的精细化管理。

参考文献:

[1] THOMAS A,GORAN A,LENNART S. Distributed generation:a definition[J]. Electric Power Systems Research,2001(57):195-204.

[2] 曾鸣,薛松,魏阳,等. 低碳智慧岛能源体系设计及经济可靠性评价模型[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):58-63.
ZENG Ming,XUE Song,WEI Yang,et al. Energy system for low-carbon-smart islands and economy-reliability assessment model[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):58-63.

[3] 吴在军,杨雷雷,胡敏强,等. 改善微网电能质量的有源电能质量调节器研究[J]. 电网技术,2012,36(7):67-73.
WU Zaijun,YANG Leilei,HU Minqiang,et al. Research on active power quality conditioner for improving power quality of microgrid[J]. Power System Technology,2012,36(7):67-73.

[4] 曾正,赵荣祥,杨欢,等. 多功能并网逆变器及其在微电网电能质量定制中的应用[J]. 电网技术,2012,36(5):58-67.
ZENG Zheng,ZHAO Rongxiang,YANG Huan,et al. A multi-functional grid-connected inverter and its application to customized power quality of micro grid[J]. Power System Technology,2012,36(5):58-67.

[5] WALID G M, EL-HAWARY M E. Fuzzy-wavelet-based electric power quality assessment of distribution systems under stationary and nonstationary disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(4):2099-2106.

[6] 康世崴,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.

[7] 熊以旺,程浩忠,王海群,等. 基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(13):48-52,71.

XIONG Yiwang,CHENG Haozhong,WANG Haiqun,et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics[J]. Power System Protection and Control, 2009,37(13):48-52,71.

[8] SALARVAND M,MOALLEM M. Obtaining a quantitative index for power evaluation in competitive electricity market[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2010,4(7):810-823.

[9] 荆朝霞,胡仁. 基于二阶段法的电能质量评估及其灵敏度分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):57-62.
JING Zhaoxia,HU Ren. Power quality evaluation based on two-stage method and its sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):57-62.

[10] 雷刚,顾伟,袁晓东. 灰色理论在电能质量综合评估中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):62-65.
LEI Gang,GU Wei,YUAN Xiaodong. Application of gray theory in power quality comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):62-65.

[11] 蒋德珑,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.
JIANG Delong,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.

[12] 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.

[13] 陈道君,龚庆武,张茂林,等. 考虑能源环境效益的含风电场多目标优化调度[J]. 中国电机工程学报,2011,31(13):10-17.
CHEN Daojun,GONG Qingwu,ZHANG Maolin,et al. Multi-objective optimal dispatch in wind power integrated system incorporating energy-environmental efficiency[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(13):10-17.

[14] 欧阳森,廖一键,刘洋,等. 基于自主式决策的综合评价方法在电能质量领域的分析与运用[J]. 电网技术,2012,36(2):70-74.
OUYANG Sen,LIAO Yijian,LIU Yang,et al. An autonomous decision-making based method for comprehensive evaluation of power quality and its application[J]. Power System Technology, 2012,36(2):70-74.

[15] ZOLFAGHARI R,SHRIVAS TAVA Y,AGELIDIS V G,et al. Using windowed ESPRIT spectral estimation for measuring power quality indices[C]//2010 IEEE PES,Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe(ISGT Europe). Gothenburg, Sweden:[s.n.],2010:1-8.

[16] 刘颖英,徐永海,肖湘宁. 地区电网电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):130-133.
LIU Yingying,XU Yonghai,XIAO Xiangning. Analysis of new method on power quality comprehensive evaluation for regional grid[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(22):130-133.

[17] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.
QIAN Kejun,YUAN Yue,SHI Xiaodan,et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(29):11-15.

[18] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000:68-88.

[19] 张天军,苏琳,乔宝明,等. 改进的层次分析法在煤与瓦斯突出危险等级预测中的应用[J]. 西安科技大学学报,2010,30(5):62-70.
ZHANG Tianjun,SU Lin,QIAO Baoming,et al. Prediction of coal and gas outburst level based on improved AHP[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2010,30(5):62-70.

[20] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. 北京大学学报,1997,33(1):12-20.
CHENG Qiansheng. Attribute recognition theoretical model with application[J]. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis, 1997,33(1):12-20.

作者简介:

李海英

李海英(1975-),女,山东烟台人,副教授,博士,研究方向为电力系统供电安全(**E-mail**:hyli@usst.edu.cn);

闵建平(1988-),女,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为面向智能电网的电能质量管理系统(**E-mail**:878513468@qq.com)。

Power quality assessment considering characteristics of distributed generation system

LI Haiying,MIN Jianping

(Department of Electrical Engineering,University of Shanghai for Science and Technology,Shanghai 200093,China)

Abstract: The emission intensity of CO_2 is quantified and taken into the comprehensive power quality assessment indices to ensure the competitive ability and enlargement initiative of distributed generation system in power market. An assessment method based on set pair principle is proposed,which introduces the connection degree and adopts the membership functions to describe the uncertainty between the power quality indices and the state levels from three perspectives:identical,discrepant and contrary. The hierarchical analysis method is applied to determine the weight coefficients and the confidence criteria and scoring criteria are combined to identify the superiority-inferiority attribute of ordered power quality partitions for different state levels and every quality level. Case study shows that,the proposed assessment method improves the rationality and delicacy of assessment results significantly.

Key words: power quality; assessment; distributed power generation; carbon emission intensity; set pair analysis; confidence criteria; scoring criteria