

能源互联网供能质量综合评估

付学谦¹, 孙宏斌¹, 郭庆来¹, 张秀容²

(1. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 由于现有算法的限制和约束, 面向电力系统的电能质量评估方法不适用于含多种分布式能源的能源互联网。为了得到能源互联网综合质量情况, 需要提出面向多种分布式能源的综合评估方法。基于国家电能质量、室内空气质量和污染物排放标准, 提出了将动态权重函数、二维惩罚函数、突变决策理论和自组织特征映射网络用于能源互联网供能质量综合评估的应用思路。最后, 采用 2 个算例验证了所提方法的有效性, 并得到了能源互联网供能质量的综合指标数值和等级评估结果。

关键词: 能源互联网; 供能质量; 二维惩罚函数; 动态权重函数; 突变隶属函数; 自组织特征映射网络; 综合评估

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.001

0 引言

2010 年, 山东大学于慎航等使用能源互联网的概念, 定义了融合大量分布式可再生能源发电装置和分布式储能装置的配电网^[1]。但其提出的互联网概念, 仍然局限于电能这一单一能源, 具有一定的局限性。中国电力科学研究院周海明等提出了能源互联网是多能源供给系统^[2], 可以向用户供电、供热和供冷等。即广义的能源互联网, 可以包括热能、动能和化学能等其他形式的能源, 融合了电力传输网、电气化交通网和天然气网等^[3]。电网的发展和互联网的发展是相互学习的过程, 相比传统电网, 能源互联网在拓扑结构上与互联网更加相似^[4]。文献^[5]以北京延庆作为示范区, 从能源生产、配送、消费、管理和运营 4 个方面设计了能源互联网的功能体系。文献^[6]基于全球能源互联网和配电能源互联网提出了虚拟电力系统和配电能源互联网。文献^[7]基于主动配电网提出城市能源互联网体系架构, 指出能源互联网系统用户侧的运行管理技术是能源互联网运行和管理的关键内容。在能源互联网系统用户侧对冷热负荷进行预测^[8]、协调优化控制^[9]、使用柔性直流技术^[10]和互联网技术^[11]等可以实现电、气、冷、热能量的优化综合利用, 进而提高可再生能源利用率和能源效率。能源互联网已经成为当前国际学术界和产业界关注的新焦点, 也是能源行业继智能电网后又一

前沿发展方向和重要课题^[12-13]。

传统的电力系统和其他能源系统的运行管理是分开的, 电能质量综合评估只面向单一的电力系统。电能质量综合评估方法^[14-24]主要是得出代表优劣的综合指标值或评定等级, 对电力市场竞争理论研究以及电能质量管理体系建设起到了重要作用。随着能源互联网的发展, 电力系统和供热供冷系统的耦合度不断增强, 形成冷热电综合能源系统。能源互联网中大量接入风电、光电、冷热电三联供装置等分布式能源会带来电能质量和供热供冷质量问题。单一能源质量评估(如电能质量或供暖质量)不能体现冷热电综合能源系统供能的总体质量情况。能源互联网中的管理主体由传统的单一电力供应商转变为综合能源供应商。电能质量评估对电力市场环境下的按质定价具有重要意义, 而对于有冷热电耦合交易的能源互联网综合能源市场具有明显的局限性。电能质量评估可以激励综合能源供应商主动处理电能质量问题, 而无法兼顾供暖供冷质量。综合能源供应商需要充分考虑冷热电能源生产对生态环境的影响。污染物排放对环境的危害是能源互联网供能质量综合评估工作中不可缺少的重要内容。

能源互联网供能质量综合评估实质上是以国家标准和政策为依据, 对冷热电综合能源系统运行水平、供应能力和污染状况进行的综合评价, 具有以下几个方面的意义: (1) 将供冷、供热、供电质量看作一个整体进行综合评估, 可以从总体上量化电力、热力、燃气扰动造成的影响和损失; (2) 有效地激励综合能源供应商与用户共同维护能源互联网供能质量环境, 同时为多种能源(电、冷、热)联合优化运行和互补协同提供依据; (3) 控制能源生产中的污染物排放量, 提高清洁能源的市场竞争力和建设积极性; (4) 可以提升能源市场的透明度, 对能源互联网综合能源市场中的冷热电耦合交易研究具有重要作用。

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2016-08-25

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAA01B04); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51321005); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590096)

Project supported by the National Key Technology R&D Program of the Ministry of Science and Technology (2015-BAA01B04), the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (513-21005) and China Postdoctoral Science Foundation (2016M-590096)

本文基于大气污染防治条例、国家电能质量标准、国家室内空气质量标准和锅炉大气污染物排放标准,建立了考虑电能质量、空气质量和污染物排放因素的能源互联网供能质量综合评估架构,采用动态加权函数分别计算电能质量和空气质量的综合指标,采用二维惩罚函数计算排污费指标和价格惩罚指标。根据计算的电能质量综合指标、空气质量综合指标、排污费指标和价格惩罚指标,采用突变决策理论计算综合指标数值,采用自组织特征映射网络进行等级评估,综合指标数值评估和等级评估结果可以起到相互验证的作用。

1 评估架构

传统的冷、热、电等分属不同的公司和行业管理,不同管理主体面临的供能质量问题不同。即使是电力行业,也分为发电企业和电网企业 2 个不同的管理主体。发电企业关注污染物排放指标限值,而电网企业则没有环境方面的硬性约束指标。在能源互联网中,会出现同时管理几类能源的公司向用户提供清洁的冷热电能源。在能源互联网中存在 3 个方面的参与主体:用户、政府和综合能源供应商,如图 1 所示。

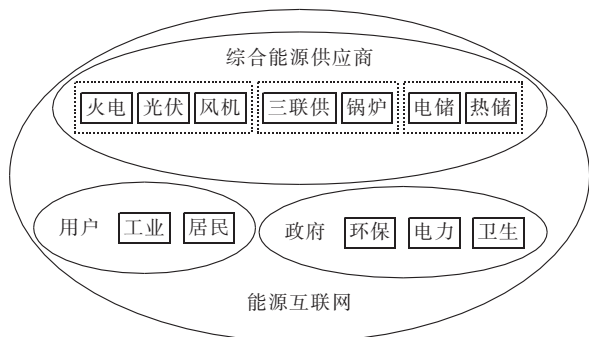


图 1 能源互联网参与主体
Fig.1 Participants of energy internet

在能源互联网中,综合能源供应商不仅需要提供优质电能,还要改善建筑物内的空气质量,并降低锅炉大气污染物排放量。能源互联网用户需要对综合能源质量做出全面的评估,以促进综合能源供应商全面提高优质服务水平。政府制定国家标准和政策,为判断综合能源供应商的供电、供冷、供热质量提供依据,并对排放的污染物进行监管。因此,能源互联网供能质量综合评估架构可以包括电能质量、空气质量和污染物排放 3 个方面的因素,如图 2 所示。

我国电能质量、空气质量和污染物排放的国家标准都很完善,各项指标都有具体的限制值。

(1)电能质量标准。我国现有的 8 项电能质量标准分别对电压偏差(GB/T 12325—2008)、电压暂降与短时中断(GB/T 30317—2013)、三相电压不平衡(GB/T 15543—2008)、频率偏差(GB/T 15945—2008)、电压波动与闪变(GB/T 12326—2008)、谐波(GB/T

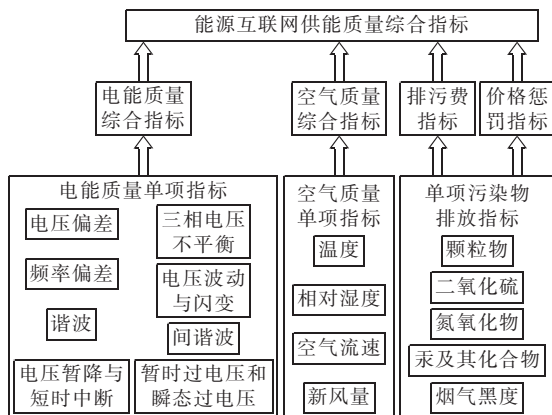


图 2 能源互联网供能质量综合评估架构
Fig.2 Architecture of comprehensive energy quality evaluation for energy internet

14549—1993)、间谐波(GB/T 24337—2009)、暂时过电压和瞬态过电压(GB/T 18481—2001)的指标值进行限定^[25]。

(2)室内空气质量标准。GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》规定了室内空气质量参数及检验方法,本文选择与供热供冷质量相关的物理性指标进行研究。

(3)污染物排放标准。2014 年国家环境保护部和国家质检总局联合发布 GB 13271—2014《锅炉大气污染物排放标准》,增加了燃煤锅炉氮氧化物和汞及其化合物的排放限值,提高了各项污染物排放标准。在用锅炉和新建锅炉执行不同标准,大气污染物排放浓度限值的指标有颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、汞及其化合物和烟气黑度。

2 评估方法

2.1 动态加权函数

目前的电能质量评估方法在求取指标权重系数时往往采用定权重的方法,没有体现单项电能质量指标值在国家标准的合格范围内和范围外的区别。当单项电能质量指标越限时,该指标的权重系数应该增大,进而对综合评估值产生破坏性影响。而对于有一项或几项电能质量指标不合格的情况,合格的指标值对评估结果影响会很小,进而计算时需要相对较小的权重系数。

根据国家电能质量标准和室内空气质量标准的规定,电能质量和供热供冷通风质量每一项指标都有相应的标准值,只要有一项质量指标不合格就需要进行治理。计算指标权重时,要考虑到存在指标不合格的评估对象的成绩要显著差于单项指标都合格的情况,不合格的指标数量越多则评估结果越差,即不合格指标数量比指标本身的值对评估结果的影响更大。同时考虑到除了不合格和合格本身的差别外,同属于合格或不合格的质量指标在数值上也存在不同。

指标 x_{ij} 对于综合评价效果的影响随着偏离最优额定值的差值增大而增大,第 i 个评估对象的指标不合格的数量对权重系数值有着决定性的影响。可以将电能质量和供热供冷通风质量指标的动态权重函数表示为:

$$w_{ij} = \begin{cases} \sin \left| \frac{x_{ij} - x_{nom,j}}{x_{bou,j} - x_{nom,j}} \times \frac{\pi}{2} \right| & x_{ij} \text{ 合格} \\ 10N_i \times e^{[(x_{ij} - x_{bou,j}) / (x_{bou,j} - x_{nom,j})]} & x_{ij} \text{ 不合格} \end{cases} \quad (1)$$

其中, w_{ij} 为第 i 个评估对象的第 j 个指标的权重系数; x_{ij} 为第 i 个评估对象的第 j 个指标的数值; $x_{nom,j}$ 为第 j 个指标的额定最优值; $x_{bou,j}$ 为第 j 个指标的限值,对于两边界情况该限值为靠近的边界值; N_i 为第 i 个评估对象中电能质量或空气质量不合格的指标数量。式(1)中计算合格和不合格情况分别采用 $\sin$ 函数和指数函数,可以体现出指标合格和不合格对权重影响的差异性,不合格指标的权重会随越限程度的增加而快速增加。

2.2 二维惩罚函数

《江苏省大气污染防治条例》第 13 条规定排污单位应当按照国家有关规定缴纳排污费;第 33 条规定对能耗超过限额标准或者排放重点大气污染物超过规定标准的企业,实行水、电、气差别化价格政策。参考该条例,自适应的惩罚函数分为排放重点大气污染物超过规定标准的惩罚函数和排污费惩罚函数。排污费惩罚函数 $\varphi_i(x)$ 和价格惩罚函数 $g_i(x)$ 分别为:

$$\varphi_i(x) = \sum_j c_j x_{ij} \quad (2)$$

$$g_i(x) = \sum_k l_k \ln(x_{ij} / x_{bou,j}) \quad (3)$$

其中, c_j 为单位污染物排放费用,不同类别污染物费用不同; k 为能耗超过限额标准的指标; $\ln$ 函数表示价格惩罚度随着超标比例的增长情况,式(3)可以根据实际政策进行调整和变化; l_k 为不同污染物超标对价格惩罚的相对程度,设 $l_k=1$ 。

2.3 突变决策理论

突变级数法^[26]评估对象中矛盾的方面设置为控制变量,不需要给出其具体计算权重就可以归一化为状态变量形式的质态,体现了指标的相对重要性。4 种最常见的初等突变模型有折叠型突变、尖点型突变、燕尾型突变和蝴蝶型突变,数学模型和多维模糊隶属函数分别为:

$$\begin{cases} f(x) = x^3 + ax \\ f(x) = x^4 + ax^2 + bx \\ f(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx \\ f(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_a = a \\ x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b} \\ x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}, x_c = \sqrt[4]{c} \\ x_a = \sqrt[4]{a}, x_b = \sqrt[5]{b}, x_c = \sqrt{c}, x_d = \sqrt[3]{d} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $f(x)$ 为势函数; x 为状态变量; a, b, c 和 d 为控制变量; x_a, x_b, x_c, x_d 分别为对应于 a, b, c, d 的 x 的取值。计算总突变隶属函数时,采用互补指标求平均值、非互补指标求最小值的原则。可以认为电能质量比供热供冷通风质量重要,由于优质的电能和优质的空气质量存在明显的关系,选择平均值原则计算总突变隶属函数。

2.4 自组织网络聚类

自组织特征映射(SOFM)网络^[27]根据样本进行学习并调整自身的权重达到学习的目的,神经元个数和训练步数越多,聚类准确率越高,训练步骤如下。

(1)初始化。权值设定为较小的随机值,输入向量 ω 和权值 λ 归一化,选取神经元的临近集合 S 。

$$\lambda' = \frac{\lambda}{\|\lambda\|} \quad (6)$$

$$\omega' = \frac{\omega}{\|\omega\|} \quad (7)$$

其中, $\|\omega\|$ 和 $\|\lambda\|$ 分别为输入向量和权值的欧几里得范数。

(2)找到最小欧氏距离的神经元。

$$D = \|\lambda - \omega\| \quad (8)$$

(3)给出一个邻域集合 S_{lin} 。

(4)利用 Kohonen 规则修正神经元和权值,其中 η 为学习速率。

$$\omega(k+1) = \omega(k) + \eta[\lambda(k) - \omega(k)] \quad (9)$$

(5)更新学习速率 η 和拓扑邻域,重新归一化权值。达到最大迭代次数后输出计算结果。

2.5 计算流程

综合考虑了电能质量、空气质量和污染物排放因素的能源互联网供能质量综合评估流程见图 3。

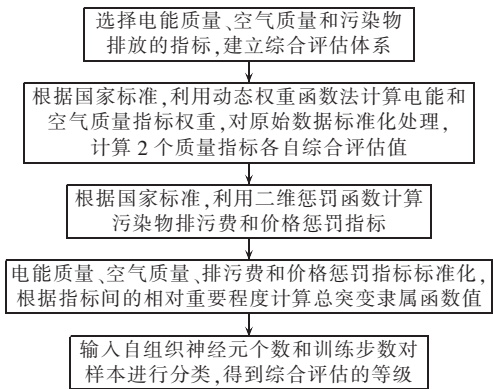


图 3 质量综合评估的流程

Fig.3 Flowchart of comprehensive quality evaluation

3 算例分析

3.1 算例 1

提出的动态权重函数评估方法与基于主成分分析和信息熵的电能质量综合评估方法进行比较,其中 5 个观测点的电能质量监测数据如表 1 所示^[22]。

各项电能质量指标合格的界限值如表 2 所示^[22]。

表 1 观测点的实测数据
Table 1 Measured data of observation points

指标	实测数据				
	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
频率偏差/Hz	0.0922	0.1562	0.1180	0.1787	0.1892
电压偏差/%	3.212	6.68	4.35	5.33	4.22
电压骤降/%	79.63	15.89	51.56	58.56	48.63
三相不平衡/%	0.83	1.36	1.35	1.74	1.83
电压波动/%	1.33	1.53	1.95	1.37	1.58
电压闪变/%	0.473	0.847	0.634	0.826	0.828
电压谐波/%	1.72	4.38	2.67	3.36	4.57
可靠性指标	0.833	0.762	0.796	0.74	0.764
服务性指标	0.832	0.713	0.864	0.684	0.783

表 2 指标的界限值
Table 2 Threshold of indexes

指标	界限值	指标	界限值
频率偏差/Hz	0.0922	电压闪变/%	0.473
电压偏差/%	3.212	电压谐波/%	1.72
电压骤降/%	79.63	可靠性指标	0.833
三相不平衡/%	0.83	服务性指标	0.832
电压波动/%	1.33		

由于 5 个观测点的各项电能质量指标均在界限值内,采用动态权重函数的 sin 函数计算权重系数。由于可靠性指标和服务性指标都是正向指标,采用 1 减去其值转化为逆向指标。使用动态加权函数计算的指标权重系数如表 3 所示。

表 3 电能质量指标权重系数
Table 3 Weights of power quality indexes

指标	权重系数				
	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
频率偏差/Hz	0.66	0.94	0.80	0.99	1
电压偏差/%	0.66	1	0.83	0.93	0.81
电压骤降/%	40	8	26	30	25
三相不平衡/%	0.61	0.88	0.87	0.98	0.99
电压波动/%	0.86	0.93	1	0.88	0.95
电压闪变/%	0.68	0.97	0.84	0.96	0.96
电压谐波/%	0.51	0.98	0.74	0.87	0.99
可靠性指标	0.77	0.95	0.88	0.98	0.94
服务性指标	0.61	0.90	0.51	0.95	0.75

由电能质量指标权重系数矩阵可以得到加权系数矩阵,然后对加权系数矩阵进行标准化计算,最后得到各单项指标的代数和。动态权重函数评估方法与基于主成分分析和信息熵的电能质量综合评估方法的评估结果如表 4 所示。

表 4 电能质量综合指标值
Table 4 Values of comprehensive power quality indexes

方法	综合指标值				
	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
动态权重函数	1.1470	6.0820	3.6300	6.5480	6.1840
文献[22]	0.1965	-0.1203	0.0557	-0.1419	-0.1305

动态权重函数评估方法计算的值越小,综合质量越优。基于主成分分析和信息熵的电能质量综合

评估方法计算的值越大,综合质量越优。可知动态权重函数与文献[22]计算的电能质量评估结果是一致的,综合指标的排序均为:观测点 1>观测点 3>观测点 2>观测点 5>观测点 4,“>”表示更优。

3.2 算例 2

待评估的 8 个样本数据包括 110 kV 电压的电能质量数据、夏季空气质量数据和新建燃气锅炉污染物排放量。由于新风量和建筑设计有很大关系,评估时不考虑该指标。烟气黑度级别共有 6 级,从 0 至 5 级。参考文献[28],设最佳空气质量指标的温度为 25.6 ℃,相对湿度为 60%,风速为 0.2 m/s。评估样本数据见表 5,其中工频过电压为标么值,后同。

表 5 样本数据的评估结果
Table 5 Results of sample evaluation

指标	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4
电压偏差/%	8.15	8.79	9.89	0.01
电压暂降持续时间/s	0.48	0.80	0.23	0.50
三相不平衡/%	1.76	0.74	2.00	0.25
频率偏差/Hz	0.19	0.11	0.03	0.17
电压波动的频度/(r·h ⁻¹)	4.84	8.45	2.09	5.52
电压闪变/%	0.06	0.59	0.23	0.15
电压总谐波畸变率/%	1.91	0.85	1.62	2.09
间谐波电压含有率/%	0.25	0.43	0.44	0.14
工频过电压	0.27	1.23	0.11	0.14
温度/℃	23.69	25.47	21.22	22.94
相对湿度/%	31.72	48.70	58.17	53.35
空气流速/(m·s ⁻¹)	0.21	0.04	0.33	0.14
颗粒物/(mg·m ⁻³)	13	10	10	19
二氧化硫/(mg·m ⁻³)	561	288	139	238
氮氧化物/(mg·m ⁻³)	289	161	290	34
烟气黑度/级	2	1	0	1
指标	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8
电压偏差/%	8.65	6.13	9.90	5.28
电压暂降持续时间/s	0.90	0.57	0.85	0.74
三相不平衡/%	1.88	1.98	2.19	2.67
频率偏差/Hz	0.03	-0.19	-0.15	0.15
电压波动的频度/(r·h ⁻¹)	6.30	0.32	6.15	3.62
电压闪变/%	0.25	0.18	0.23	0.05
电压总谐波畸变率/%	1.50	1.61	1.34	0.37
间谐波电压含有率/%	0.10	0.28	0.32	0.21
工频过电压	0.18	0.22	0.81	0.75
温度/℃	23.99	23.57	20.74	23.58
相对湿度/%	33.33	32.99	58.76	63.49
空气流速/(m·s ⁻¹)	0.12	0.30	0	0.02
颗粒物/(mg·m ⁻³)	2	6	9	12
二氧化硫/(mg·m ⁻³)	423	335	454	598
氮氧化物/(mg·m ⁻³)	15	91	174	159
烟气黑度/级	1	0	2	0

由指标限值标准可知,原始计算样本中出现了指标不合格的情况,如表 6 所示。

使用动态加权函数计算电能质量和空气质量的综合值,计算的指标权重系数如表 7 所示。

污染物排放是能源互联网综合质量的减分项,其危害不采用动态加权函数计算,而用二维惩罚函数把污染物排放情况转换为排污费和价格惩罚 2 个指

表 6 不合格样本数据
Table 6 Unqualified samples

指标		不合格的样本
电能质量	三相不平衡	7、8
	电压总谐波畸变率	4
	间谐波电压含有率	2、3
空气质量	温度	3、7
	相对湿度	1、5、6
	空气流速	3
	二氧化硫	1、8
	氮氧化物	1、3
	烟气黑度	1、7

表 7 指标权重系数
Table 7 Weights of indexes

指标	样本 1	样本 2	样本 3	样本 4
电压偏差/%	0.96	0.98	1.00	0
电压暂降持续时间/s	0.68	0.95	0.35	0.70
三相不平衡/%	0.98	0.55	1.00	0.20
频率偏差/Hz	1.00	0.75	0.25	0.97
电压波动变的频度/(r·h ⁻¹)	0.69	0.97	0.32	0.76
电压闪变/%	0.09	0.80	0.35	0.23
电压总谐波畸变率/%	1.00	0.62	0.95	10.44
间谐波电压含有率/%	0.82	10.68	10.97	0.51
工频过电压	0.32	1.00	0.13	0.17
温度/℃	0.74	0.06	24.84	0.92
相对湿度/%	15.13	0.78	0.14	0.50
空气流速/(m·s ⁻¹)	0.21	0.63	27.08	0.85

指标	样本 5	样本 6	样本 7	样本 8
电压偏差/%	0.98	0.82	1.00	0.74
电压暂降持续时间/s	0.99	0.78	0.97	0.92
三相不平衡/%	1.00	1.00	10.99	14.00
频率偏差/Hz	0.25	1.00	0.93	0.91
电压波动变的频度/(r·h ⁻¹)	0.84	0.05	0.82	0.54
电压闪变/%	0.38	0.27	0.35	0.08
电压总谐波畸变率/%	0.92	0.95	0.87	0.29
间谐波电压含有率/%	0.40	0.90	0.95	0.73
工频过电压	0.22	0.26	0.83	0.78
温度/℃	0.65	0.77	14.17	0.77
相对湿度/%	13.96	14.20	0.10	0.27
空气流速/(m·s ⁻¹)	0.96	1.00	0.06	0.30

标。烟气黑度指标参与价格惩罚计算,不参与排污费计算。设颗粒物、二氧化硫、氮氧化物的污染物排放费分别为 0.01 元/mg、0.006 元/mg、0.008 元/mg^[29],计算的排污费和价格惩罚如表 8 所示。

表 8 排污费和价格惩罚
Table 8 Pollutant discharge fees and price punishments

样本	排污费/(元·m ⁻³)	价格惩罚	样本	排污费/(元·m ⁻³)	价格惩罚
1	5.81	1.18	5	2.68	0
2	3.12	0	6	2.80	0
3	3.25	0.37	7	4.21	0.69
4	1.89	0	8	4.98	0.18

对评估样本的电能质量、空气质量、排污费和价格惩罚数据标准化处理。超过限额标准除了价格惩罚还可能会触犯环境保护法,可以认为代表排放污染物不合格的价格惩罚比排污费对评估结果影响更

大。使用蝴蝶型突变数计算总突变隶属函数,为体现污染排放对综合评估结果的负面影响,指标重要性排序为价格惩罚>排污费>电能质量>空气质量,“>”表示更加重要。计算的总突变隶属函数值越小,则性能越优秀,具体计算值如图 4 所示。

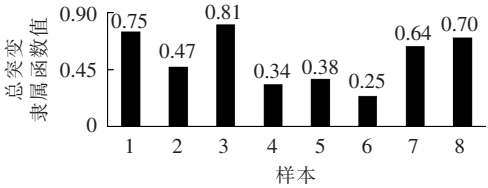


图 4 总突变隶属函数值
Fig.4 Values of general catastrophe membership function

由图 4 可知,在计算值的百分位就可以明显区别评估结果的优劣情况。样本 1、样本 3、样本 7 和样本 8 的污染物排放不符合国家标准,综合评估成绩最低,体现了污染排放不达标的负面影响。样本 2、样本 4、样本 5 和样本 6 的污染物排放符合国家标准,其中样本 6 成绩最优秀,具有相对较少的污染物排放和相对优质的空气质量和电能质量。

SOFM 网络竞争层神经元有 6×6 个,训练步为 10 次,五边形为神经元,小线段为神经元的连接,不同颜色表示神经元距离的远近,颜色越深表示距离越远。邻近权重距离情况如图 5 所示。神经元分类图如图 6 所示。图中横轴、纵轴分别对应竞争神经元维数的行和列。

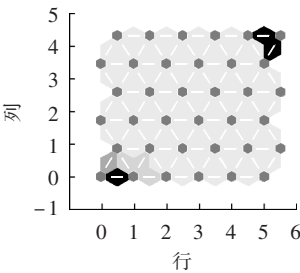


图 5 邻近权重距离
Fig.5 Neighbor weight distances

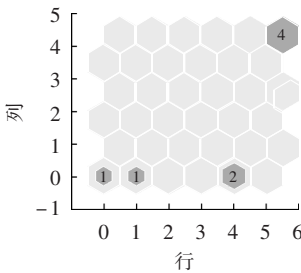


图 6 神经元分类情况
Fig.6 Classification of neurons

各样本的获胜神经元分别为 1、36、2、36、36、36、5、5,样本 2、样本 4、样本 5 和样本 6 属于一类,可以划分为第一等级,样本 7 和样本 8 可以归为一类。突变隶属数值的大小与 SOFM 网络分类情况是一致的,起到了相互验证的作用。8 个样本综合指标的计算等级结果如表 9 所示。

表 9 综合评估等级
Table 9 Quality level of samples

评估等级	样本	评估等级	样本
1	2、4、5、6	3	1
2	7、8	4	3

4 结论

本文考虑用户侧供电供热供冷的综合服务质量,将电能质量和供热供冷通风质量看作一个整体进行评估,可以从总体上量化冷热电能量流扰动造成的影响,同时兼顾了污染物排放对综合评估结果的影响。动态加权函数评估方法体现了单项电能质量指标越限对综合评估值产生的影响,使得指标不合格对评估值的影响程度得到量化。单项指标不合格评估结果比多指标数值较差却合格的情况评估结果更差,不合格指标的数量比指标数值对评估结果的影响更大。二维惩罚函数评估方法体现了污染排放量对综合评估指标值的负面影响,包括了排污惩罚和价格惩罚2个方面的因素。综合供能质量的研究对能源互联网的研究和发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.
YU Shenhong,SUN Ying,NIU Xiaona,et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):104-108.
- [2] 周海明,刘广一,刘超群. 能源互联网技术框架研究[J]. 中国电力,2014,47(11):140-144.
ZHOU Haiming,LIU Guangyi,LIU Chaoqun. Study on the energy internet technology framework[J]. Electric Power,2014,47(11):140-144.
- [3] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
TIAN Shiming,LUAN Wenpeng,ZHANG Dongxia,et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3482-3494.
- [4] 赵海,蔡巍,王进法,等. 能源互联网架构设计与拓扑模型[J]. 电工技术学报,2015,30(11):30-36.
ZHAO Hai,CAI Wei,WANG Jinfa,et al. An architecture design and topological model of intergrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(11):30-36.
- [5] 黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):26-33,40.
HUANG Renle,PU Tianjiao,LIU Kewen,et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):26-33,40.
- [6] 张小平,李佳宁,付灏. 配电能源互联网:从虚拟电厂到虚拟电力系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3532-3540.
ZHANG Xiaoping,LI Jianing,FU Hao. Distribution power & energy internet:from virtual power plants to virtual power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3532-3540.
- [7] 蒲天骄,刘克文,陈乃仕,等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术 [J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3511-3521.
PU Tianjiao,LIU Kewen,CHEN Naishi,et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3511-3521.
- [8] 陈飞翔,胥建群,王晨杨,等. 能源互联网系统用户侧冷热负荷预测模型研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3678-3684.
CHEN Feixiang,XU Jianqun,WANG Chenyang,et al. Research on building cooling and heating load prediction model on user's side in energy internet system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3678-3684.
- [9] 孙秋野,滕菲,张化光,等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3667-3677.
SUN Qiuye,TENG Fei,ZHANG Huaguang,et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3667-3677.
- [10] 王一振,赵彪,袁志昌,等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3551-3560.
WANG Yizhen,ZHAO Biao,YUAN Zhichang,et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3551-3560.
- [11] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
DONG Zhaoyang,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. From smart grid to energy internet:basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(15):1-11.
- [12] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光. 能源互联网:理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):1-8.
SUN Hongbin,GUO Qinglai,PAN Zhaoguang. Energy internet: concept,architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(19):1-8.
- [13] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等. 能源互联网:驱动力、评述与展望[J]. 电网技术,2015,39(11):3005-3013.
SUN Hongbin,GUO Qinglai,PAN Zhaoguang,et al. Energy internet:driving force,review and outlook[J]. Power System Technology,2015,39(11):3005-3013.
- [14] 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.
- [15] 赵霞,赵成勇,贾秀芳,等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评估[J]. 电网技术,2005,29(6):11-15.
ZHAO Xia,ZHAO Chengyong,JIA Xiufang,et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight [J]. Power System Technology,2005,29(6):11-15.
- [16] 李连结,姚建刚,龙立波,等. 组合赋权法在电能质量模糊综合评估中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(4):56-60.
LI Lianjie,YAO Jiangang,LONG Libo,et al. Application of combination weighing method in fuzzy synthetice valuation[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(4):56-60.
- [17] 周林,栗秋华,张凤,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 Qiuhua,ZHANG Feng,et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network[J]. High Voltage Engineering,2007,33(9):66-69.
- [18] 付学谦,陈皓勇. 基于理想解法的电能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):26-30.

- FU Xueqian, CHEN Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on TOPSIS approach [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 26-30.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 王磊, 王秋莎, 吴丽红, 等. 基于主成分分析与信息熵的电能质量综合评估[J]. 陕西电力, 2015, 43(8): 55-58.
- WANG Lei, WANG Qiusha, WU Lihong, et al. Power quality synthetic evaluation based on principal component analysis and information entropy [J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(8): 55-58.
- [23] 乔鹏程, 吴正国, 李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综评估方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 88-92.
- QIAO Pengcheng, WU Zhengguo, LI Hui. Power quality synthetic evaluation based on improved radar chart [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 88-92.
- [24] 雷刚, 顾伟, 袁晓冬. 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, 70.
- 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, 70.
- [25] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5073-5079.
- LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5073-5079.
- [26] SAUNDERS P T. An introduction to catastrophe theory [M]. New York, UK: Cambridge University Press, 1980: 30-40.
- [27] KOHONEN T. Self-organizing neural projections [J]. Neural Networks, 2006, 19(6): 723-733.
- [28] 嵇赞喆, 高屹, 王晓杰, 等. 空气流速对人体热舒适影响的研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2003, 39(2): 95-99.
- Ji Yunzhe, GAO Yi, WANG Xiaojie, et al. Research of the effect of air velocity on thermal comfort [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2003, 39(2): 95-99.
- [29] 孔淑琴, 牛铭, 付学谦, 等. 微网孤网经济运行研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(4): 57-62.
- KONG Shuqin, NIU Ming, FU Xueqian, et al. Research on economical operation of island microgrid [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(4): 57-62.

作者简介:



付学谦

付学谦(1985—),男,河北博野人,工程师,助理研究员,博士,主要研究方向为电能质量评估、能源互联网规划与运行、电力系统不确定性分析(E-mail: fuxueqian@tsinghua.edu.cn);

孙宏斌(1969—),男,浙江天台人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能电网、可再生能源和电动汽车接入电网、电力系统运行与控制(E-mail: shb@tsinghua.edu.cn);

郭庆来(1979—),男,吉林吉林人,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为无功电压控制和电动汽车并网技术;

张秀容(1989—),女,广东清远人,博士研究生,主要研究方向为光纤通信 OCDMA 网络技术、5G 移动通信系统和关键技术、电波测量与信道建模。

Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet

FU Xueqian¹, SUN Hongbin¹, GUO Qinglai¹, ZHANG Xiurong²

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Due to the constraints and limitations of existing algorithms, the power quality evaluation methods of power system are not suitable for the energy internet with multiple distributed energy resources. A comprehensive evaluation method orienting to multiple distributed energy resources is proposed to assess the comprehensive quality of energy internet. An application concept based on the state standards of power quality, indoor air quality and pollutant discharge is proposed to apply the dynamic weight function, two-dimensional penalty function, catastrophe theory and self-organizing feature map network to the comprehensive evaluation of energy quality for the energy internet. The validity of the proposed method is analytically verified by two cases, and the energy quality indexes and levels of energy internet are comprehensively evaluated.

Key words: energy internet; energy quality; two-dimensional penalty function; dynamic weight function; catastrophe membership function; self-organizing feature map network; comprehensive evaluation