

复杂电网电能质量知识云评价服务模型与方法

阴艳超, 吴仁杰, 常斌磊
(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:针对复杂电网系统时空动态特性对电能质量评价的影响,构建跨时空分布的多维知识云协同评价服务框架,提出了基于多维多规则的电能质量云评价方法。分析不同监测点和不同监测时间段电能质量水平评估的时空特性,建立每项电能质量指标包括期望、熵和超熵3个数字特征的知识云,构建多维知识云协同评价服务框架;构建电能质量综合评价的前件云和后件云模型,并提出基于多维多规则的电能质量云评价规则及算法,分析各评估指标与质量等级之间不确定映射关系在值域空间和确定度空间的分布,完成电能质量综合评价从定量输入到动态推理再到定量输出的映射变换;开发了电能质量云评价功能组件。通过实例对比和分析证明所提评价框架及方法的可行性和有效性。

关键词:复杂电网;电能质量;云评价;时空动态特性;知识云;评价服务

中图分类号:N 945;TM 711

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.034

0 引言

随着电力负荷的不断增长,特别是非线性、冲击性负荷比例的不断增大,电力系统电能质量问题日趋严峻。同时,随着电网规模的不断扩大,部分电能质量指标在渗透过程中的变化将更复杂,不仅显现衰减的特性,还可能呈现叠加与放大的情况;此外,电压暂态问题日益受到关注,引起电压暂态的主要原因是系统故障,某一地区的电压暂态事件往往不是由本地区造成的,而是由其他地区的传播造成的后果。因此,电能质量问题呈现明显的时空动态特性^[1]。在考虑电能质量时空动态特性的基础上进行电能质量的评价、治理,具有重要的理论意义、应用价值。

近年来,国内外学者针对电能质量综合评价问题从电能质量评价体系、指标权重计算、评价方法等方面进行了较多的探索,并取得了一定的研究成果,提出了较多的电能质量评价方法,如基于模糊数学理论的方法^[2-3]、基于概率统计学原理的方法^[4]、基于人工智能算法的评价方法^[5-6]、灰色关联理论法^[7]、基于物元分析的评价方法^[8-9]等。上述研究方法各有侧重点,但大多没有从动态响应时空分布的角度考虑评价对象的过程信息,难以解决电能质量和污染责任评价中出现的误判问题,进而无法提供客观合理的评价结论。而且,现有的研究对于指标的选择及影响权重的分配主要通过专家经验来确定,主观性较强,并且对电能质量指标等级划分的边界过硬,难以满足复杂电力系统动态变化、柔性可调

的需求,无法客观反映各类负荷和离散分布式电网系统及设备的运行状态。

本文针对电能质量评价中存在的 uncertainty 问题和评价对象的时空动态特性,搭建多维知识云协同评价服务框架,采用包括电能质量评价指标、推理规则和评价方法的知识云对典型监测环节进行评价服务调用,并引入云模型理论,采用逆向云对各评价指标进行云化处理,将定量指标信息转化为定性概念,建立影响评价过程信息的多维多规则动态云发生器,通过时序约束进行评价指标动态加权,采用循环更新云模型的方法增强云发生器的动态评价能力,实现电能质量评估定性定量转换,客观反映了电能质量评估过程的动态性、复杂性和耦合性。

1 跨时空分布多维知识云协同服务

1.1 电能质量知识云组织与封装

a. 电能质量知识云跨时空分布特性。

随着电力市场的建立,电能已转化为由电力部门向电力用户提供电力供应及辅助服务的特殊商品,电能质量作为电力商品的重要属性,成为电网与用户以及电网与售电公司之间共同关注的重要问题。电能质量监测点不仅分布在公共连接点(PCC)处、用户与电力公司协商的指定节点,还会分散在电网公司与售电公司产权分界点以及干扰源用户侧,电能质量监测点为呈地域分布、时序排布的离散信息单元。因此,针对不同监测点和不同监测时间段对电能质量指标进行实时监测评估,使得电能质量水平评估具有典型的时空特性。

b. 知识云组织与封装。

针对任意时间段、任意监测点的电能质量水平评估的时空特性,建立每项电能质量指标包括期望(E_x)、熵(E_n)、超熵(H_e)3个数字特征的知识云,通过隶属云对电能质量评价过程中的时空模糊性、随

收稿日期:2017-04-24;修回日期:2018-03-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1400301);国家自然科学基金资助项目(51365022)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB1400301) and the National Natural Science Foundation of China(51365022)

机性进行统一量化描述。在此基础上,建立电能质量各项评价指标的逆向云模型,并通过评价指标动态加权组合不同的前件云、后件云,最后基于多维规则的电能质量云评价规则评估时空电能质量水平。

电网电能质量知识云组织与封装如图 1 所示。围绕时空分布的电能质量监测单元,建立电压偏差 b_1 、频率偏差 b_2 、谐波电压含有率 b_3 、电压波动性 b_4 、电压闪变 b_5 、电压暂态事件数 b_6 、三相不平衡 b_7 、供电可靠性 b_8 、服务型指标 b_9 等电能质量评价指标^[10]的知识云,并将电能质量监测数据、评价指标知识云、评估方法等进行封装,构成具有定向服务功能的知识云,如电压偏差知识云、频率偏差知识云,各指标知识云通过本体映射关系和语义关联,以形成电能质量评价的知识体系。通过调用相关定向服务功能的知识云进行评价服务,提高复杂电网全域电能质量的评价效率。

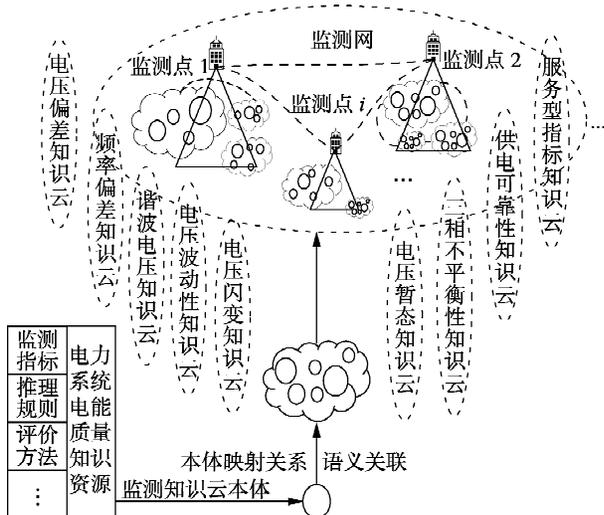


图 1 电网电能质量知识云组织与封装

Fig.1 Knowledge cloud package and organization of power quality

1.2 跨时空分布知识云评价框架构建

针对复杂电网电能质量评价问题建立多维知识云协同评价服务框架,如图 2 所示。首先,对电能质量监测平台中的评价任务、监测点特征信息、用户需求等进行分析,针对典型监测点及其评价环节,建立电能质量评价服务流程库,并将分散的电能质量监测点的指标知识云、推理规则云、评价方法云封装为电能质量监测多维知识云,构成多维知识资源库;然后,针对典型监测点及其评价环节,依据“多任务并行、少任务串行”的原则,建立包括评价活动执行时间、序列和规则的评价流程库;最后,依据知识云推理机制,建立电能质量评价指标前件云和后件云模型,并设计推理规则,构建推理器,进行定性与定量相结合的电能质量综合评价。

电能质量评价服务过程采用多维多规则知识云推理的评价方法进行分析、计算。评价指标、推理规

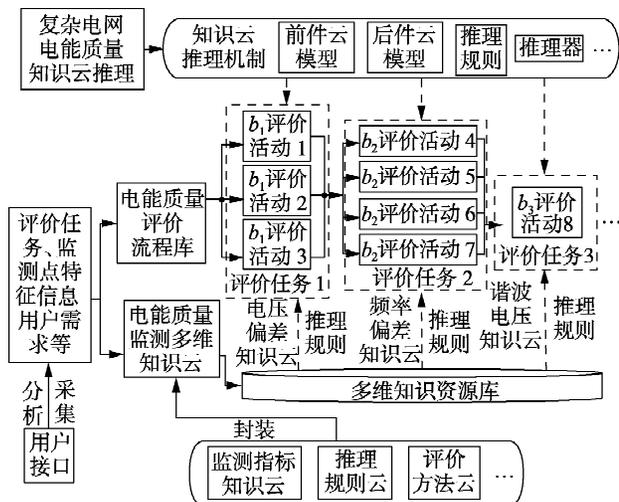


图 2 多维知识云协同评价服务框架

Fig.2 Collaborative assessment service framework of multi-dimensional knowledge cloud

则、评价方法封装于典型评价环节的知识云中,通过在评估任务中调用已封装的多维知识云,完成电能质量评价。因此,基于多维多规则云模型的电能质量综合评价模型、推理算法是该框架的运行核心。

2 云评价的不确定规则推理

2.1 电能质量云推理的基本概念和数字特征

设 $U = \{x\}$ 为电能知识云中可参数化表示的知识资源的论域, T 为 U 中定性概念的子集。 U 中的元素 x 对于 T 所表达的定性概念的隶属度(或称 x 与 T 的相容度)为 $C_T(x)$ ($C_T(x) \in [0, 1]$), 隶属度在 U 中的分布称为隶属云^[11], t 为从论域 U 到区间 $[0, 1]$ 的映射, 即 $C_T(x) : U \rightarrow [0, 1], x \rightarrow C_T(x)$ 。

云推理模型通过期望(E_x)、熵(E_n)和超熵(H_e)这 3 个数字特征,将电能质量评价过程中定性概念的模糊性和随机性进行统一量化描述,即对隶属云的分布特性进行描述,以克服电能质量评价过程中的不确定性。期望值 E_x 是模糊概念在论域中的中心值,它隶属于该概念的程度为 100%,是最能代表该定性概念的值;熵 E_n 是定性概念模糊度的度量, E_n 的大小反映了在论域中可被模糊概念所接受的数值范围,体现了定性概念的裕度, E_n 越大,概念越模糊;超熵 H_e 是 E_n 的熵, H_e 越大,则云滴越离散,云的厚度越大,隶属度的随机性也越大^[11]。

2.2 评价指标的综合加权

电能质量知识云评价过程中,电能质量指标的重要性受到电网系统地域分布、时序排布和用户需求等多种因素的影响,不同指标在综合评价中所占的比重不同,因此需要依据电力系统的特点赋予电能质量客观合理的权重属性。在客观赋权法^[12]和云的相对贴近度法^[13]的基础上,通过任意 2 个云滴的距离反映该指标在评价过程中的相对重要程度和

动态特性,并计算各评价指标的综合权重值。

假设在任意时刻评价论域空间 U 中有 2 个评价指标知识云 $C_{t1}(E_{xt1}, E_{nt1}, H_{et1})$ 、 $C_{t2}(E_{xt2}, E_{nt2}, H_{et2})$, 则 2 个评价指标知识云的相对贴进度表示为 $R_{t1,t2} = |E_{xt1} - E_{xt2}|$, 利用逆向云计算评价指标对应的云数字特征值 $(E_{xt1i}, E_{nt1i}, H_{et1i})$ 、 $(E_{xt2i}, E_{nt2i}, H_{et2i})$ ($t=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m$), 则各评价指标的动态权重值为:

$$\lambda_i = R_{t1,t2i} / \sum_{i=1}^m R_{t1,t2i} \quad (1)$$

假设由熵权法求得的权重值为 ω_{01} , 由均方差法求得的权重值为 ω_{02} , 则结合几何平均值法求得客观权重值为:

$$\omega_{0i} = \frac{\sqrt{\omega_{01i}\omega_{02i}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\omega_{01i}\omega_{02i}}} \quad (2)$$

利用加法集成法, 由式(1)、(2)得出任意时刻的综合权重 ξ_i 为:

$$\xi_i = a\lambda_i + b\omega_{0i} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{r-1} \left[(\delta_1 + 2\delta_2 + \dots + r\delta_r) - \frac{r+1}{r} \right]$$

$$b = 1 - a$$

其中, δ_i 为对动态权重向量按升序排列后求得的对分量; r 为评价指标个数。

2.3 云评价的不确定规则推理

云推理模型中, 输入一个值则输出一个规律性结果, 称这种推理关系为一维云。一维云模型可以用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 这 3 个参数表征, 利用 if X then Y 的常用推理方法实现数据从定量输入到定性推理, 再到定量输出的转换过程, 其中, X 为云评价规则前件, 用一维云模型 (E_{xx}, E_{nx}, H_{ex}) 表示; Y 为推理规则后件, 用一维云模型 (E_{xy}, E_{ny}, H_{ey}) 表示。用规则前件云 X 和规则后件云 Y 发生器构造规则生成器。多规则云推理由多个一维单规则云推理组成, 因此复杂的不确定性规则可以表示为: “if $A \& B \& C \& \dots$ then D ”, 其中 A, B, C, \dots 用不同论域上的对象(即多维空间的电能质量评价知识云)表示。通过构造各类高维云发生器解决复杂不确定性推理问题^[14], 即利用电能质量综合评价云映射的不确定规则推理方法, 通过设置云的期望、熵和超熵为数字特征, 描述更为复杂的定性与定量之间的转换关系。

通过知识云化处理构建电能质量评价体系的多维度前件(X 条件)云模型, 然后通过对电能质量的评价规则和结果的云化处理构建电能质量评价规则的多维度后件(Y 条件)云模型, 如式(4)–(7)所示。

n 维 X 条件云模型为:

$$(P_{x1i}, P_{x2i}, \dots, P_{xni}) = R_n(E_{nx1i}, E_{nx2i}, \dots, E_{nxi}, H_{ex1i}, H_{ex2i}, \dots, H_{exni}) \quad (4)$$

$$\mu_i = e^{-1/2} \left[\frac{\xi_1(x_1 - E_{xx1i})^2}{2P_{x1i}^2} + \frac{\xi_2(x_2 - E_{xx2i})^2}{2P_{x2i}^2} + \dots + \frac{\xi_n(x_n - E_{xxni})^2}{2P_{xni}^2} \right] \quad (5)$$

n 维 Y 条件云模型为:

$$(P_{y1i}, P_{y2i}, \dots, P_{yni}) = R_n(E_{ny1i}, E_{ny2i}, \dots, E_{yni}, H_{ey1i}, H_{ey2i}, \dots, H_{eyni}) \quad (6)$$

$$y_i = nE_{yni} \pm \sqrt{-2\ln \mu} (P_{y1i} + P_{y2i} + \dots + P_{yni}) \quad (7)$$

其中, ξ_i 为综合权重; $E_{xxni}, E_{nxni}, H_{exni}$ 为规则前件的 n 维评价云模型数字特征; $E_{yni}, E_{nyni}, H_{eyni}$ 为规则后件的 n 维评价云模型数字特征; μ 为前件条件输入值的激活强度。用 n 个一维 X 条件发生器和 n 个一维 Y 条件发生器可以构成基于多维多规则电能质量评价云模型发生器, 实现推理结构为:

$$\begin{cases} \text{if } A_{11} \& A_{21} \& \dots \& A_{n1} \text{ then } C_{11} \\ \text{if } A_{12} \& A_{22} \& \dots \& A_{n2} \text{ then } C_{12} \\ \vdots \\ \text{if } A_{1m} \& A_{2m} \& \dots \& A_{nm} \text{ then } C_{1m} \end{cases}$$

因此, 通过将 X 条件云模型和 Y 条件云模型进行多元组合, 可以实现不同结构的电能质量评价规则推理。电能质量评价的多维多规则动态推理发生器如图 3 所示。在多维多规则动态推理发生器中输入 x_i 刺激不同评估任务条件 $P_{CGx11}, P_{CGx21}, \dots, P_{CGxn1}, P_{CGx12}, P_{CGx22}, \dots, P_{CGxn2}, \dots, P_{CGx1m}, P_{CGx2m}, \dots, P_{CGxnm}$, 产生不同的 u_{ij} ; 再由知识规则处理 $C_{GU1}, C_{GU2}, \dots, C_{GUm}$ 产生多个云滴, 通过加权平均处理后输出对应的输出值 E_{xc} 。

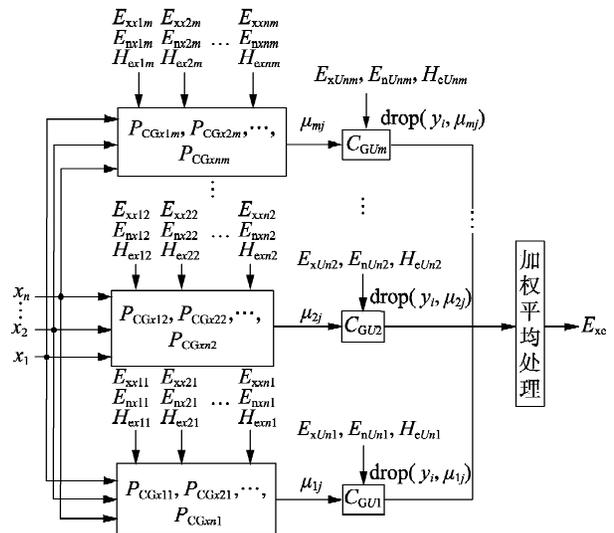


图 3 电能质量评价的多维多规则动态推理发生器

Fig.3 Multi-dimensional and multi-rule dynamic reasoning generator of power quality evaluation

3 基于多维多规则云模型的电能质量综合评价

3.1 电能质量评价前件云模型

根据前述分析,将选定的 9 个电能质量的评价结果分为 5 个等级,分别为 1 级(优秀)、2 级(良好)、3 级(中等)、4 级(合格)、5 级(不合格)。电能质量各指标的等级界限值^[15]如表 1 所示^[9]。

表 1 电能质量各评价指标的等级界限

Table 1 Grade limits of power quality evaluation indices

等级	评价指标界限								
	$b_1/\%$	b_2/Hz	$b_3/\%$	$b_4/\%$	$b_5/\%$	b_6	$b_7/\%$	b_8	b_9
1 级	≤ 1.2	≤ 0.05	≤ 1	≤ 0.5	≤ 0.2	≥ 0.9	≤ 0.5	≥ 0.95	≥ 0.9
2 级	≤ 3.0	≤ 0.10	≤ 2	≤ 1.0	≤ 0.5	≥ 0.8	≤ 1.0	≥ 0.85	≥ 0.8
3 级	≤ 4.5	≤ 0.15	≤ 3	≤ 1.5	≤ 0.8	≥ 0.5	≤ 1.5	≥ 0.80	≥ 0.7
4 级	≤ 7.0	≤ 0.20	≤ 5	≤ 2.0	≤ 1.0	≥ 0.1	≤ 2.0	≥ 0.70	≥ 0.6
5 级	≥ 7.0	≥ 0.20	≥ 5	≥ 2.0	≥ 1.0	≤ 0.1	≥ 2.0	≤ 0.70	≤ 0.6

注:以上各等级的划分建立在电压为 380 V 的情况下。

由于评价指标的变化范围 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 为双边约束空间,且其空间边界具有随机性和模糊性,依据云模型的 $3E_n$ 原则^[16]对表 1 的数据进行云化处理,通过式(8)确定各指标的 3 个数字特征:

$$\begin{cases} E_x = (C_{\min} + C_{\max}) / 2 \\ E_n = (C_{\max} - C_{\min}) / 6 \\ H_e = k_e \end{cases} \quad (8)$$

其中, k_e 为常数,可根据评价模型的需求进行调整。

计算各评价指标的 3 个数字特征后,即可确定各指标的云模型,构建评价指标前件云模型。以指标“电压偏差 b_1 ”为例,其处于不同等级时的定性语言描述为“较小、小、一般、大、很大”,其对应的定量云模型分别为 $b_{11} = (0.605\ 0, 0.201\ 7, 0.080\ 0)$ 、 $b_{12} = (2.145\ 0, 0.319\ 3, 0.080\ 0)$ 、 $b_{13} = (3.705\ 0, 0.268\ 3, 0.080\ 0)$ 、 $b_{14} = (5.795\ 0, 0.435\ 0, 0.080\ 0)$ 、 $b_{15} = (8.500\ 0, 0.533\ 3, 0.080\ 0)$ 。其他评价指标的云模型描述依此类推,如表 2 所示。

3.2 电能质量评价的后件云模型

如 3.1 节所述,将电能质量的评定结果分为 5 个定性的等级,通过计算电能质量等级的 3 个数字特征实现该定性等级描述到量化的转换。确定电能质量等级的云模型,即建立电能质量评价的后件云模型,其对应的云模型如表 3 所示。

利用 MATLAB 绘制电能质量等级云模型的离散图能够对各等级云模型特征进行直观表示,如图 4 所示。由图 4 可见,等级云模型离散图近似正态分布;等级 3、4 的云模型的熵 E_n 相等且为最大值,则其云模型宽度相同且最大。

3.3 电能质量云推理规则

由电能质量评价结果的 5 个定量化等级划分,利用定性语言描述对电能质量综合评价云推理规则

表 2 电能质量评价指标前件云模型

Table 2 Antecedent cloud model of power quality evaluation indices

指标	评价指标云模型				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
b_1	(0.605 0,	(2.145 0,	(3.705 0,	(5.795 0,	(8.500 0,
	0.201 7,	0.319 3,	0.268 3,	0.435 0,	0.533 3,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_2	(0.025 5,	(0.079 5,	(0.120 5,	(0.179 5,	(0.300 0,
	0.008 5,	0.010 2,	0.010 2,	0.010 2,	0.036 7,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_3	(0.550 0,	(1.500 0,	(2.500 0,	(4.000 0,	(6.500 0,
	0.183 3,	0.200 0,	0.200 0,	0.336 7,	0.533 3,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_4	(0.255 0,	(0.795 0,	(1.205 0,	(1.795 0,	(3.000 0,
	0.085 0,	0.101 7,	0.101 7,	0.101 7,	0.366 7,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_5	(0.105 0,	(0.350 0,	(0.650 0,	(0.945 0,	(1.500 0,
	0.035 0,	0.020 0,	0.053 3,	0.051 7,	0.200 0,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_6	(0.945 0,	(0.850 0,	(0.650 0,	(0.300 0,	(0.055 0,
	0.018 3,	0.020 0,	0.053 3,	0.070 0,	0.018 3,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_7	(0.255 0,	(0.795 0,	(1.205 0,	(1.795 0,	(3.000 0,
	0.085 0,	0.101 7,	0.101 7,	0.101 7,	0.366 7,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_8	(0.974 5,	(0.900 0,	(0.820 5,	(0.750 0,	(0.355 0,
	0.008 5,	0.017 0,	0.010 2,	0.020 0,	0.118 3,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)
b_9	(0.945 0,	(0.850 0,	(0.750 0,	(0.650 0,	(0.305 0,
	0.018 3,	0.020 0,	0.020 0,	0.020 0,	0.101 7,
	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)	0.080 0)

表 3 电能质量评价等级后件云模型

Table 3 Consequent cloud model of power quality evaluation grades

数字特征	后件云模型				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
E_x	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
E_n	0.10	0.15	0.20	0.20	0.10
H_e	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

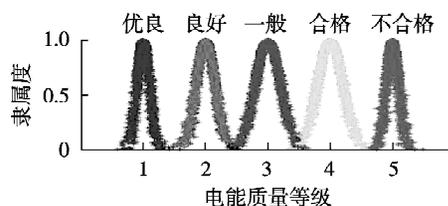


图 4 电能质量等级云模型

Fig.4 Grade cloud model of power quality

定义如下。

规则 1:if 电压偏差较小 & 频率偏差较小 & 谐波电压总畸变率较小 & 电压闪变较小 & 电压暂态事件数较小 & 三相不平衡较小 & 供电可靠率很高 then 电能质量等级为优良。

规则 2:if 电压偏差小 & 频率偏差小 & 谐波电压总畸变率小 & 电压闪变小 & 电压暂态事件数小 & 三相不平衡小 & 供电可靠率高 then 电能质量等级为良好。

规则 3:if 电压偏差一般 & 频率偏差一般 & 谐波电压总畸变率一般 & 电压闪变一般 & 电压暂态事件数一般 & 三相不平衡一般 & 供电可靠率一般 then 电能质量等级为中等。

规则 4:if 电压偏差大 & 频率偏差大 & 谐波电压总畸变率大 & 电压闪变大 & 电压暂态事件数较大 & 三相不平衡大 & 供电可靠率低 then 电能质量等级为合格。

规则 5:if 电压偏差很大 & 频率偏差很大 & 谐波电压总畸变率很大 & 电压闪变很大 & 电压暂态事件数大 & 三相不平衡很大 & 供电可靠率较低 then 电能质量等级为不合格。

3.4 电能质量评价的多维多规则动态推理算法

根据由电能质量评价指标建立的定性规则,依据图 3 所示云模型定性推理机制,可以给定电能质量评价等级来评价某个监测点的电能质量,基于多维多规则云模型定性推理过程如下。

输入:电能质量评价指标的数字特征值($E_{x_{x11}}, E_{n_{x11}}, H_{e_{x11}}$)、 \dots 、($E_{x_{x_{n1}}}, E_{n_{x_{n1}}}, H_{e_{x_{n1}}}$)、 \dots 、($E_{x_{xij}}, E_{n_{xij}}, H_{e_{xij}}$)、 \dots 、($E_{x_{xnm}}, E_{n_{xnm}}, H_{e_{xnm}}$)以及电能质量评价等级的数字特征值($E_{x_{U11}}, E_{n_{U11}}, H_{e_{U11}}$)、 \dots 、($E_{x_{Un1}}, E_{n_{Un1}}, H_{e_{Un1}}$)、 \dots 、($E_{x_{Uij}}, E_{n_{Uij}}, H_{e_{Uij}}$)、 \dots 、($E_{x_{Unm}}, E_{n_{Unm}}, H_{e_{Unm}}$),其中 n 为生成云滴的个数, m 为论域个数,给定输入 $x_i (i \in \mathbf{N}^+)$ 。

输出:依据激活规则数,随机输出单个/多个值。

多维多规则云模型定性推理算法的步骤如下。

步骤 1:判断给定输入 x_i 激活规则的数量。

步骤 2:若激活 1 条规则,则按照以下步骤进行。

步骤 2.1:生成以 $E_{n_{xni}}$ 为期望值、 $H_{e_{xni}}$ 为标准差的一维正态随机数 $E'_{n_{xni}}$,然后根据给定条件值,按照式(5)计算隶属度。

$$\tilde{\mu} = (e^{\xi_1 \mu_1}) \times (e^{\xi_2 \mu_2}) \times \dots \times (e^{\xi_n \mu_n}) = \exp \left\{ - \left[\frac{\xi_1 (x_1 - E_{xx1i})^2}{2E_{nx11}^2} + \frac{\xi_2 (x_2 - E_{xx2i})^2}{2E_{nx21}^2} + \dots + \frac{\xi_n (x_n - E_{xxni})^2}{2E_{nxn1}^2} \right] \right\}$$

步骤 2.2:再根据已获取的评价知识规则后件(Y 条件云模型),产生以 $E_{n_{U1i}}$ 为期望值、 $H_{e_{U1i}}$ 为标准差的 n 维正态值 $E'_{n_{U1i}}$,按照式(7)计算 y_i 。

$$y_i = E_{U1i} \pm \sqrt{-2 \ln \tilde{\mu}} E'_{n_{U1i}}$$

步骤 2.3:令 $(y_i, \tilde{\mu})$ 为云滴,计算云滴期望值。

步骤 2.4:返回步骤 2.1,循环若干次,最终计算所有云滴的期望值的平均值并输出。

步骤 3:若激活 2 条规则,则按照以下步骤进行。

步骤 3.1:若对每一条单规则,产生以 $(E_{n_{x11}}, E_{n_{x21}})$ 为期望、以 $(H_{e_{x11}}, H_{e_{x21}})$ 为方差的符合二维正

态分布的随机值 $(E_{n_{x1i}}, E_{n_{x2i}})$,并根据给定输入任务条件 (μ_1, μ_2) ,计算隶属度,方法同步骤 2.1。

步骤 3.2:取 $\tilde{\mu}_i$ 中的 $\tilde{\mu}_1$ 和 $\tilde{\mu}_2$ 相应的 2 条单规则,根据评价等级后件的 $(E_{n_{U11}}, H_{e_{U11}})$ 随机生成以 $E_{n_{U11}}$ 为期望、 $H_{e_{U11}}$ 为方差的一维正态随机值,根据式(7)计算 y_{1i} 和 y_{2i} 。

步骤 3.3:选取最外侧的 2 个边界云滴云滴 $(y_1, \tilde{\mu}_1)$ 和 $(y_2, \tilde{\mu}_2)$ 构建一个虚拟云,其数字特征为 (E_{xc}, E_{nc}, H_{ec}) ,暂定超熵 $H_{ec} = 0$,通过几何方法求解方差组可得云团的期望如下。

$$E_{xc} = \frac{y_1 \sqrt{2 \ln \tilde{\mu}_2} + y_2 \sqrt{2 \ln \tilde{\mu}_1}}{\sqrt{2 \ln \tilde{\mu}_2} + \sqrt{2 \ln \tilde{\mu}_1}}$$

$$E_{nc} = \frac{|y_1 - y_2|}{\sqrt{2 \ln \tilde{\mu}_2} + \sqrt{2 \ln \tilde{\mu}_1}}$$

步骤 4:若激活多条规则,则每一条单规则依据步骤 2 输出多个云滴,计算所有云滴的期望值的平均值并输出。或者依据步骤 3.1、3.2 获得每条规则的隶属度 $\tilde{\mu}_i$,然后取 $\tilde{\mu}_i$ 中最大值 $\tilde{\mu}_1$ 和次大值 $\tilde{\mu}_2$,依据步骤 3.3,计算得出所有云滴的期望值。

步骤 5:重复步骤 1—4,直到输出值 E_{xc} 的个数满足电能质量评价的要求,最终确定电能质量等级。

4 实例应用

提取文献[5-6,8-9]中重庆市沙坪坝区某 5 个监测点 9 个电能质量指标实测数据做对比试验,所评价监测点的监测环境、负荷类型、运行状态、影响因素均一致,具有可比较性。在知识云评价模式下,5 个监测点相互连接构成监测网。利用 Java、XML、JavaScript 等语言及相关编程技术和软硬件设备开发复杂电网知识云评价服务功能组件,实现电能质量综合评价从定量输入到定性推理再到定量输出的推理功能。

复杂电网知识云评价服务功能模块见图 5。首先,用户将 5 个监测点的电能质量实测数据(如表 4 所示)输入服务系统;然后,系统自动激活相关评价推理规则,通过“激活规则”查看规则信息;其次,系统根据所激活规则推送指标计算相关参数,用户可在“参数修正”中对不合理参数进行修正;确认评估参数设置无误后计算各监测点电能质量评价输出值,并匹配相应的电能质量评估结果描述信息;最后,输出评价结果,并生成评价报表存储于云服务器。

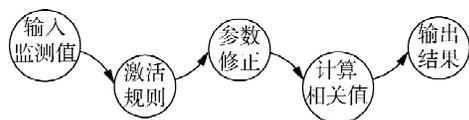


图 5 复杂电网知识云评价服务功能模块

Fig.5 Function module of knowledge cloud assessment service for complex grid

表4 电能质量实测数据

Table 4 Measured data of power quality

监测点	$b_1/\%$	b_2/Hz	$b_3/\%$	$b_4/\%$	$b_5/\%$	b_6	$b_7/\%$	b_8	b_9
1	3.212	0.092 2	1.72	1.33	0.473	0.796 3	0.83	0.833	0.832
2	6.680	0.156 2	4.28	1.53	0.847	0.158 9	1.36	0.762	0.713
3	4.350	0.118 0	2.67	1.95	0.634	0.515 3	1.35	0.796	0.864
4	5.330	0.178 7	3.36	1.37	0.826	0.585 6	1.74	0.740	0.684
5	4.220	0.189 2	4.57	1.58	0.828	0.486 3	1.83	0.764	0.783

以监测点3为例,评价指标权重计算结果见表5。计算并输入该监测点各指标综合权重值,将其9个指标监测值输入多维多规则云模型定性推理发生器,得

表5 监测点3的评价指标权重

Table 5 Weights of evaluation indices of monitoring point 3

权重类型	权重								
	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
动态	0.090 6	0.144 8	0.086 5	0.130 6	0.070 9	0.100 6	0.100 6	0.120 6	0.154 8
客观	0.083 6	0.159 1	0.067 1	0.176 6	0.065 4	0.078 4	0.086 3	0.136 6	0.146 9
综合	0.087 5	0.151 1	0.078 0	0.150 7	0.068 6	0.090 9	0.094 3	0.127 6	0.151 3

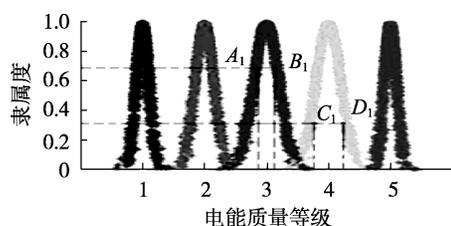


图6 监测点3的电能质量云评价结果

Fig.6 Evaluation results of power quality cloud of monitoring point 3

表6 评价结果对比

Table 6 Comparison of evaluation results

监测点	E_x	电能质量等级				
		云评价	文献[5]	文献[6]	文献[8]	文献[9]
1	2.000 8	2级	2级	2.044 5级	2级	2级
2	3.938 8	4级	4级	4级	4级	4级
3	3.006 3	3级	3级	3级	3级	3级
4	3.952 0	4级	4级	3.461 5级	4级	4级
5	3.982 4	4级	4级	4级	4级	4级

从表6可看出,云评价方法可得到电能质量准确量化的评价结果,定性和定量评价相结合,综合评价结果更精确,且克服了电能质量分类等级划分边界过硬的缺陷,更贴近电能质量评价的实际情况。此外,本文所提方法可根据实际评估要求,调整评估知识云的推理规则,调用已封装的知识云,采用本体映射、语义关联规则等相互配合执行,实现时空电能质量水平准确、快速地评估。

5 结论

本文将解决不确定性的云推理模型应用到复杂电网电能质量动态特性评价中,建立每项电能质量指标的数字特征知识云,及包括典型监测环节

到云等级模型离散图见图6,则电能质量综合评价推理规则3和规则4被激活,隶属度最大为 $\mu_1 = 0.687 5$ 和次大 $\mu_2 = 0.308 0$,对应到后件云发生器中各生成2个云滴,在图6所示云等级模型离散图的 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 这4个云滴中,选取最外侧的 $A_1(2.878 0, 0.687 5)$ 和 $D_1(4.231 9, 0.308 0)$ 这2个云滴,按照上述电能质量评价算法的步骤3.3进行计算,可得 $E_x = 3.006 3$,则该条件下监测点3的电能质量等级为3级,对应语言描述为“一般”。同理,对其他监测点的电能质量进行云评价并输出评价结果。将云评价结果与文献[5-6,8-9]的结果进行对比,见表6。

的评价流程库,构建多维知识云协同评价服务框架,用云模型的数字特征表征定性概念,对电能质量指标定量与定性转换中的模糊性、动态性、随机性进行描述,克服了模糊集理论中隶属函数的固有缺陷,同时本文引入评价云的相对贴近度,通过不同评价时刻任意两个云滴的距离来反应电能指标的动态特性,并采用动态加权的方式赋予各评价指标相应的权重,最后开发了电能质量云评价功能组件,为复杂电网不同监测点和不同监测时间段电能质量指标实时性监测评估的研究提供了新思路、方法和实现技术。

参考文献:

- [1] 张恒旭,刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报,2009,29(7):64-70.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.
- [2] REDDY M V, SODHI R. A rule-based S-transform and AdaBoost based approach for power quality assessment [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 134(4): 66-79.
- [3] MORSI W G, EL-HAWARY M E. Power quality evaluation in smart grids considering modern distortion in electric power systems [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(5): 1117-1123.
- [4] 王勇,刘金宁,曹曼,等. 基于概率论与证据理论的风电场电能质量评估方法研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2012, 39(3): 65-70.
WANG Yong, LIU Jinning, CAO Man, et al. Research on the evaluation method with power quality of wind power based on probability theory and evidence theory [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2012, 39(3): 65-70.
- [5] 黄静,马宏忠,纪奔. 密切值法在电能质量综合评价中的应用[J]. 继电器, 2008, 36(3): 60-63.
HUANG Jing, MA Hongzhong, JI Hui. Application of intimate data method in synthetical evaluation about power quality [J]. Relay, 2008, 36(3): 60-63.

- [6] 周林, 栗秋华, 张凤. 遗传投影寻踪插值模型在电能质量综合评价中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 32-35.
ZHOU Lin, LI Qiuhua, ZHANG Feng. Application of genetic projection pursuit interpolation model on power quality synthetic evaluation[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 32-35.
- [7] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.
SHEN Yangwu, PENG Xiaotao, SHI Tongqin, et al. A grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 67-73.
- [8] 李如琦, 苏浩益. 基于可拓云理论的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 66-70.
LI Ruqi, SU Haoyi. A synthetic power quality evaluation model based on extension cloud theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 66-70.
- [9] 黄剑, 周林, 栗秋华, 等. 基于物元分析理论的电能质量综合评价[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(6): 25-29.
HUANG Jian, ZHOU Lin, LI Qiuhua, et al. Evaluation of power quality based on the method of matter-element [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(6): 25-29.
- [10] 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.
- [11] 杜鹤, 李德毅. 基于云的概念划分及其在关联挖掘上的应用[J]. 软件学报, 2001, 12(2): 196-203.
DU Yi, LI Deyi. Concept partition based on cloud and its application to mining association rules [J]. Journal of Software, 2001, 12(2): 196-203.
- [12] 雷刚, 顾伟, 袁晓冬. 灰色理论在电能质量综合评价中的应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 62-70.
LEI Gang, GU Wei, YUAN Xiaodong. Application of gray theory in power quality comprehensive evaluation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 62-70.
- [13] 王洪利, 冯玉强. 基于云模型具有语言评价信息的多属性群决策研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(6): 679-685.
WANG Hongli, FENG Yuqiang. On multiple attribute group decision making with linguistic assessment information based on cloud model [J]. Control and Decision, 2005, 20(6): 679-685.
- [14] 王威, 马东辉, 苏经宇, 等. 基于二维多规则云模定性推理的场地分类方法[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(10): 1364-1372.
WANG Wei, MA Donghui, SU Jingyu, et al. Site classification method based on qualitative reasoning of 2-D & multi-rules cloud model [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(10): 1364-1372.
- [15] 乔鹏程, 吴正国, 李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评价方法[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.
- [16] 杨宏伟, 岳勇, 杨学强. 一种新的一维正态云概念隶属度判定算法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(9): 2117-2123.
YANG Hongwei, YUE Yong, YANG Xueqiang. New determining algorithm for conception membership of one-dimensional normal cloud [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(9): 2117-2123.

作者简介:



阴艳超

阴艳超(1977—),女,河南安阳人,副教授,博士,主要研究方向为智能制造、知识工程、复杂系统(E-mail: yinyc@163.com);

吴仁杰(1992—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为先进制造技术、复杂系统;

常斌磊(1991—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统、知识工程。

Knowledge cloud evaluation service model and method for power quality of complex power grid

YIN Yanchao, WU Renjie, CHANG Binlei

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the influence of the spatial-temporal dynamic characteristics of complex power grid on the evaluation of power quality, a collaborative evaluation service framework based on the spatial-temporal multi-dimensional knowledge cloud is established and a multi-dimensional and multi-rule based cloud evaluation method for power quality is proposed. The spatial-temporal characteristics of power quality level evaluation at different monitoring points and different monitoring periods is analyzed, and the knowledge cloud of each power quality index is established including three numerical characteristics of expectation, entropy and hyper entropy, and the collaborative evaluation service framework of multi-dimensional knowledge cloud is built. The antecedent cloud model and consequent cloud model of power quality comprehensive evaluation are built and the rules and algorithm of the multi-dimensional and multi-rule based cloud evaluation are proposed, based on which the distribution of uncertain mapping relationship between each evaluation index and quality level is analyzed in the range space and certainty space, and the mapping transformation of power quality comprehensive evaluation from quantitative inputs to dynamic reasoning then to quantitative outputs is realized. The cloud evaluation functional components of power quality are developed. The feasibility and effectiveness of the proposed evaluation framework and method are verified by case study.

Key words: complex power grid; power quality; cloud evaluation; spatial-temporal dynamic characteristics; knowledge cloud; evaluation service