

DOI: 10.7667/PSPC161092

基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价

宋人杰¹, 丁江林¹, 白丽², 刘鹏², 李冠男²

(1. 东北电力大学信息工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林供电公司, 吉林 吉林 132000)

摘要: 针对目前配电网中模糊综合评价法存在评价结果单一、忽略配电网指标数据的随机性和模糊性, 提出了一种基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价方法。该方法首先建立配电网综合评价指标体系, 然后采用合作博弈法得到各指标的常权重。再利用变权公式进行常权重的修正, 在模糊综合评价的基础上, 利用梯形云模型代替隶属度函数, 实现对配电网的综合评价。最后以某城市配电网为算例, 分析评价结果, 该算例表明此方法对配电网进行综合评价是可行的。

关键词: 配电网; 模糊综合评价; 梯形云模型; 合作博弈法; 隶属度函数

Fuzzy comprehensive evaluation of distribution network based on cooperative game theory and trapezoidal cloud model

SONG Renjie¹, DING Jianglin¹, BAI Li², LIU Peng², LI Guannan²

(1. School of Information Science and Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;
2. State Grid Jilin Power Supply Company, Jilin 132000, China)

Abstract: Because the present Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE) of distribution network has the characteristics of single evaluation, ignoring the randomness and fuzziness of the index data of the distribution network, a fuzzy comprehensive evaluation of distribution network based on cooperative game theory and trapezoidal cloud model is proposed. The method firstly establishes comprehensive evaluation index system for distribution network. Then it gets the index of constant weight by means of cooperative game method, corrects the constant weight by variable weight formula, and on the basis of fuzzy comprehensive evaluation, the trapezium cloud model instead of membership function, realizes the comprehensive evaluation of distribution network. Finally, taking a city distribution network as an example, the evaluation results are analyzed and the results show that this method is feasible for the comprehensive evaluation of distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61271115).

Key words: distribution network; fuzzy comprehensive evaluation; trapezoidal cloud model; cooperative game method; membership function

0 引言

配电网综合评价是一项非常复杂的系统工程, 配电网综合评价指标体系的构建、评价指标权重的确定以及评价模型的选择直接影响着配电网综合评价的结果。随着逐轮配电网改造的进行, 对配电网进行综合评价是非常必要的。现有配电网评价的关键是在于指标体系的构建、指标权重的确定和评价模型的选择 3 个部分。模糊综合评价是常用的一种

综合评价方法。文献[1]中利用模糊综合评价和重心法相结合的评价方法, 弥补丢失信息的不足。文献[2]通过引入盲目信息, 改进了模糊综合评价中常用的三角、梯形隶属度函数, 使其考虑多种不确定因素。文献[3]中利用组合赋权法确定电能质量指标权重, 利用模糊综合评价法对电能质量进行整体评价。文献[4]中利用模糊综合评价法对配电网的运行经济性进行综合评价。文献[5]专注于智能配电网指标体系的构建, 对配电网的评价运用专家打分并且利用曲线拟合得到得分公式, 对配电网进行评价。文献[6]提出一种基于关联规则和证据理论相结合的

组合权重的模糊评价方法。

以上文献中模糊综合评价法的关键是隶属度函数的确定,隶属度函数是人为确定的;并且文献[7]中对隶属度函数提出了质疑;中国工程院院士李德毅教授在概率论和模糊数学的基础上提出了云的概念,并研究了模糊性和随机性及两者的关联。文献[8]中将云模型应用到变压器状态评估中。文献[9]中提出了梯形云模型,梯形云模型更为一般的云模型,可以表示多个元素肯定属于概念。文献[10]中将梯形云模型运用到电能质量数据的挖掘中。文献[11]中将云模型用于检测电能质量状态。文献[12]提出一种基于变权重系数的继电保护模糊状态评价方法。

针对模糊综合评价中隶属度函数的缺陷和梯形云模型的优点,在已有研究的基础上,本文利用梯形云模型代替模糊隶属度函数,对配电网各指标进行等级概念区间划分,解决传统模糊综合评价中区间划分的边界过硬问题,再基于模糊综合评价法对配电网进行综合评价;传统的组合赋权法是引入调节因子^[4],来调节主、客观权重,而调节因子的取值是根据经验确定的,为克服这一缺陷本文借鉴合作博弈确定组合权重的方法计算指标权重,以协调不同权重确定方法的不一致系数,有利于避免人为因素的影响;由于常权重无法反映个别关键指标数值偏离正常值时对配电网状态带来的影响,因此本文采用变权公式对常权进行修正;提出了基于合作博弈法和梯形云模型的配电网模糊综合评价方法。

1 配电网指标体系的构建

为了科学、合理地综合评价配电网,需要选取具有代表性的指标。构建配电网综合评价指标体系时应遵循6大原则:1)目的性,配电网指标的选出必须符合同一的评价目的,并且指标能准确的描述配电网系统的特征,以目的为导向来选取指标;本文以配电网的整体运行状态为评价目的为导向来选取评价指标。2)系统性,指标体系能从整体上体现配电网的主要特征,指标的层次结构要明确、清楚;为了充分体现配电网指标体系的层次结构和整体性,利用层次分析法构建配电网指标体系。3)可操作性,选取的配电网的基础指标必须是可采集的,且采集成本不宜过大,本文在选择取指标时主要考虑指标采集的难易程度。4)独立性,各个指标之间应相互独立,但由于配电网指标体系的复杂性决定了各个指标之间完全独立是不可能的,以最大可能性保持各个指标之间的独立性,分析指标之间相关性方法来保证评价指标之间尽可能的相对独立。

5)显著性,在构建指标体系时并不是指标个数越多越好,指标个数越多就意味着导致数据冗余的可能性越大;本文用主要的关键评价指标来体现配电网指标体系的显著性。6)动态性,随着配电网的改造和评价目的改变,指标体系需要做出相对应的调整。

根据上述原则,在已有研究的基础上,本文从安全性、优质性、经济性、智能性、环保性和可持续性6个方面构建配电网综合评价指标体系。满足安全性要求是配电网正常运行的前提,随着逐轮配电网改革的进行,配电网的安全性相比而言已得到保障,但其在配电网指标体系中的重要地位不可动摇;随着配电网的发展和消费者消费方式的多元化对配电网进行优质性和经济性评价是必不可少的^[13-14]。满足供电可靠性和电能质量的要求是配电网智能化发展的内在需求;随着配电网智能化的发展,对配电网的智能化进行评价是必然趋势^[15-16];随着分布式能源的发展和分布式电源接入配电网,对配电网进行环保性和可持续性评价是体现配电网健康发展的必要手段。于是本文从这6个方面对配电网进行综合评价,构建的配电网指标体系如图1。

2 配电网指标权重的确定

配电网指标权重的确定一直是配电网综合评价中的关键步骤,目前确定权重的方法主要有层次分析法^[17]、熵权法^[18]、反熵权法^[5]、理想零点法^[19]、组合赋权法^[3-4]等。层次分析法属于主观赋权法,通过两两比较的方法确定各指标的相对重要性,然后由专家打分确定各个指标的权重,易受到专家意见的主观性局限。熵权法和反熵权法都是客观赋权法,其中熵权法对指标差异性较敏感,即指标样本数据差异性对熵权法影响较大。组合赋权法是将主观赋权法确定的权重和客观赋权法确定的权重引入调节因子进行线性加权,调节因子取值是根据经验决定,故本文利用合作博弈确定组合权重,避免人为因素的影响。由于层次分析法中要进行一致性检验,不利于用程序实现。故本文利用改进的层次分析法即相容矩阵分析法求取主观权重。

2.1 相容矩阵分析法

相容矩阵分析法是对层次分析的改进,避免了层次分析法决定权重的一致性校验。在现有配电网综合评价指标体系下,根据配电网专家经验确定配电网每一层的各评价指标相对重要程度构造判断矩阵 A ,比较标度含义如表1,相容矩阵分析法的思想是将判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 中的元素 a_{ij} 进行修正使其满足一致性条件的判断矩阵。其计算步骤如下。

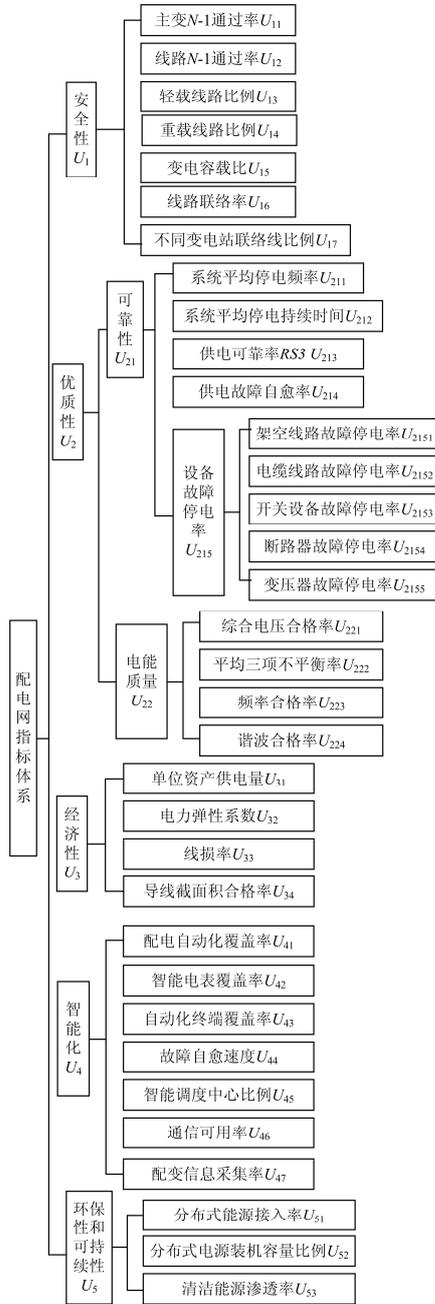


图 1 配电网综合评价指标体系

Fig. 1 Distribution network comprehensive evaluation index system

1) 构造判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, $a_{ii}=1$, $a_{ij}=1/a_{ji}$;

2) 令 $b_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n a_{ik} \cdot a_{kj}}$, 得到的相容矩阵 $B=(b_{ij})_{n \times n}$, B 满足 $b_{ii}=1$, $b_{ij}=1/b_{ji}$, $b_{ij}=b_{ik} \cdot b_{kj}$;

3) 求指标权重 w_i

$$w_i = \frac{c_i}{\sum_{k=1}^n c_k} \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中, $c_i = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n b_{ik}}$, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

表 1 α_{ij} 的标度含义

Table 1 Scale meaning of α_{ij}

标度数字	两指标比较标度的含义
1	同样重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	非常重要
9	极其重要
2, 4, 6, 8	上述相邻标度的中间值
以上各数的倒数	反比较, $a_{ij}=1/a_{ji}$

2.2 基于合作博弈确定组合权重

基于合作博弈确定组合权重^[20]的基本思想是: 将若干种确定权重的单一方法结成联盟, 作为一个整体采用合作博弈的思想确定组合权重, 尽可能的提高组合权重的精确度。该方法易于用程序实现, 输入为分别用不同的方法 $i(i=1, 2, 3, \dots, k)$ 确定指标权重 $W(i)$, 输出为 k 种权重的组合权重, 具体步骤如下。

Step1 计算 $W(i)$ 与 $W(k-i)$ 的一致性相关系数 L_i 。

$$L(i) = \frac{\sum_{j=1}^k [W_j(i) - \overline{W(i)}][W_j(k-i) - \overline{W(k-i)}]}{\left\{ \sum_{j=1}^k [W_j(i) - \overline{W(i)}]^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{j=1}^k [W_j(k-i) - \overline{W(k-i)}]^2 \right\}^{1/2}} \quad (2)$$

式中: $W_j(i)$ 为使用第 i 种方法计算的第 j 个指标的权重; $W(k-i)$ 为除了 $W(i)$ 外的 $k-1$ 种权重 $W(1), \dots, W(i-1), W(i+1), \dots, W(k)$ 的组合权重; k 为权重中指标的个数; “—” 表示求平均值。

Step2 求组合权重 W' 。

$$W' = \sum_{i=1}^k W(i)L(i) \quad (3)$$

Step3 由于 $W(k-i)$ 表示除 $W(i)$ 外的 $k-1$ 种权重的最佳组合, 所以与求 k 种权重的最佳组合 W 的方法一样, 可以采用递归调用, 每调用一次权重个数减 1, 直到权重的个数等于 2 为止。

Step4 权重个数等于 2 时, $W' = \frac{W(1) + W(2)}{2}$ 。

Step5 将 W' 归一化得到权重 W 。本文分别采用相容矩阵分析法、熵权法、反熵权法计算指标权重。反熵权法计算权重的步骤详见文献[5], 熵权法计算权重的步骤详见文献[18]。

2.3 确定变权

层次分析法、熵权法、反熵权法等方法确定的权重是固定的, 不会因状态或评价因素的不同而发

生改变。而在配电网综合评价指标体系中，当某些指标数值偏离正常值时，往往表示配电网某部分性能下降，需加强巡查，但在常权评判模式中可能会因其权重较小，整体评价还是正常的，不能反映配电网的真实状态。故在配电网状态评估中，常权不合适。因此采用文献[21]带均衡函数的变权公式。

$$w_i^\alpha = w_i x_i^{\alpha-1} / \sum_{j=1}^n w_j x_j^{\alpha-1} \quad (4)$$

式中： w_i^α 为第*i*个指标的变权重； w_i 为第*i*指标的常权重； x_i 为*i*指标归一化后的值； α 为均衡函数， $0 \leq \alpha \leq 1$ ，其取值决定于各指标的相对重要程度。当排除某些指标的严重缺陷时，取 $\alpha < 0.5$ ；当对指标的均衡度要求不够高时，取 $\alpha > 0.5$ 。本文中 x_i 取指标数据的得分， $\alpha = 0$ 。

3 配电网综合评价模型

3.1 模糊综合评价模型

模糊综合评价法是根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价。模糊综合评价方法分为单层和多层，以二层模糊综合评价模型为例，说明其建立步骤：

Step1 确定评价指标集。设第一层指标有*m*个指标，记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ，根据归属关系分成*k*个子集，则 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}$ 。

Step2 建立评价等级集。评价等级集是指标评价标准集合，设有*l*个评价标准，即评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_l\}$ 。

Step3 确定指标权重。计算第一层指标的权重，得到*k*权重向量 $w_i = \{w_{i_1}, w_{i_2}, \dots, w_{i_n}\}$ ，其中 $i = 1, 2, 3, \dots, k$ 。

Step4 确定隶属度矩阵。根据隶属度函数得到第二层指标的隶属度矩阵 R_i 。

Step5 计算评估向量。

$$B_i = w_i R_i = [b_{i_1}, b_{i_2}, \dots, b_{i_m}] \quad (5)$$

Step6 计算综合评估向量。第二层指标权重向量 $w = [w_1, w_2, \dots, w_k]$ ， U 的隶属度矩阵 $R = [B_1, B_2, \dots, B_k]$ ，最终的评估向量为

$$B = wR = [b_1, b_2, \dots, b_l] \quad (6)$$

3.2 基于梯形云模型的模糊综合评价模型

在模糊综合评价中评价集的划分是把数据定义域划分到多个离散相邻的区间，这种区间的划分导致区间边界过硬。配电网模糊综合评价中，对于定量指标，根据指标数值的分布情况确定相应的隶属度函数。此方法只能考虑指标的模糊性，忽略了随机性。云模型是一种实现定性概念与定量数值之间

的转换的不确定性模型^[7]，云有3个数字特征 E_x, E_n, H_e ，云模型考虑了指标相对状态的模糊性和随机性。分析配电网指标，配电网指标有正指标、中间型指标、负指标，正指标是指标取值越大越好，中间型指标是其理想值是中间值或中间区间，负指标是其取值越小越好。正态云模型的3个数字特征只能反映正指标和负指标的特征，不能反映中间型指标，故本文利用梯形云模型；梯形云用期望区间 $[E_{x1}, E_{x2}]$ 、熵 E_n 和超熵 H_e 表示整体定量特性，可以用这4个数字特征构成的4元组 $(E_{x1}, E_{x2}, E_n, H_e)$ 描述梯形云。其中 $E_{x1} \leq E_{x2}$ ，当 $E_{x1} = E_{x2}$ 时梯形云特殊化为正态云。

本文将配电网分为差、一般、中等、良好、优秀等5个等级。分析各类等级数据和各个指标的理想值可得到对应状态的梯形云隶属函数，其中正向指标的“差”等级、负向指标的“优秀”等级采用右半梯形云模型描述；正向指标的“优秀”和负向指标的“差”等级采用左半梯形云模型描述。根据梯形云模型的数字特征和指标值，指标对应的各等级的隶属度计算步骤如下。

Step1 判断指标值*x*，如果*x*属于 $[E_{x1}, E_{x2}]$ ，则隶属度 $\mu = 1$ ；如果 $x < E_{x1}$ ，则 $E_x = E_{x1}$ ；如果 $x > E_{x2}$ ，则 $E_x = E_{x2}$ 。

Step2 计算隶属度。

$$\mu = \exp\left(\frac{-(x - E_x)^2}{2(E'_n)^2}\right) \quad (7)$$

式中， E'_n 是以 E_n 为期望、 H_e 为标准差生成的一个正态随机数。隶属度的计算可以通过*x*条件梯形云模型发生器实现。将模糊综合评价中隶属度矩阵 R_i 用梯形云模型的隶属度代替。根据已有指标数值的分布、模糊综合评价中各指标的隶属度函数和各指标的理想值的取值情况计算得到各指标的梯形云模型，由于指标繁杂仅列出安全性属性下的所有指标对应等级的梯形云模型见表2，其中主变N-1通过率的云模型隶属度如图2所示。

综上所述，基于合作博弈法和梯形云模型的模糊综合评价法的配电网评价模型的步骤如下：

Step1 构建配电网综合评价指标体系，确定状态等级；

Step2 运用合作博弈法确定各指标的常权，再由变权公式对常权进行修正，得到变权；

Step3 基于梯形云模型得到梯形云隶属度，按式(7)得到指标对应状态的隶属度，并且归一化；

Step4 根据模糊综合评价法步骤，按式(5)和式(6)得到评估向量；

Step5 对于综合评估向量，利用最大隶属度原则，得出最后的评价结果。

表 2 指标的梯形云模型

Table 2 Trapezoidal cloud model of the index data

指标	梯形云模型表述				
	差	一般	中等	良好	良好
U_{11}	右半云 C(0,0,0.1,0.005)	C(0.56,0.56,0.02,0.001)	C(0.6875,0.6875,0.02,0.001)	C(0.8125,0.8125,0.02,0.001)	左半云 C(1,1,0.02,0.001)
U_{12}	右半云(0,0.2,0.08,0.04)	C(0.72,0.72,0.013,0.007)	C(0.8,0.8,0.013,0.007)	C(0.88,0.88,0.013,0.007)	左半云 C(1,1,0.013,0.007)
U_{13}	左半云 C(0.6,1,0.08,0.04)	C(0.34,0.34,0.007,0.0035)	C(0.3,0.3,0.007,0.0035)	C(0.26,0.26,0.007,0.0035)	右半云 C(0,0.2,0.007,0.0035)
U_{14}	左半云 C(0.6,1,0.08,0.04) 右半云(0,1.1,0.053,0.027)	C(0.34,0.34,0.007,0.0035)	C(0.3,0.3,0.007,0.0035)	C(0.26,0.26,0.007,0.0035)	右半云 C(0,0.2,0.007,0.0035)
U_{15}	和左半云 (2.8,+∞,0.05,0.025)	C(1.46,1.46,0.013,0.007) 和 C(2.455,2.455,0.013,0.007)	C(1.54,1.54,0.013,0.007) 和 C(2.37,2.37,0.013,0.007)	C(1.64,1.64,0.021,0.015) 和 (2.265,2.265,0.021,0.015)	C(1.8,2.1,0.017,0.008)
U_{16}	右半云(0,0.116,0.058)	C(0.75,0.75,0.016,0.008)	C(0.85,0.85,0.016,0.008)	C(0.95,0.95,0.016,0.008)	左半云 C(1,1,0.016,0.008)
U_{17}	右半云(0,0.058, 0.029)	C(0.4,0.4,0.016,0.008)	C(0.5,0.5,0.016,0.008)	C(0.6,0.6,0.016,0.008)	左半云 C(1,1,0.06,0.03)

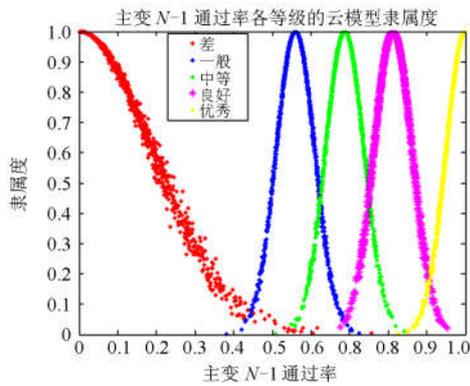


图 2 模型隶属度

Fig. 2 Membership of cloud model

4 实例分析

对某地区的现状电网进行评价, 主要基础数据如表 3 所示。利用此地区的配电网历史数据, 并且分别利用熵权法和反熵权法计算权重; 利用十位专家得到判断矩阵, 并且根据相容矩阵分析法计算主观权重; 利用各种确定权重的方法分别计算指标权重如表 4, 利用合作博弈方法确定组合权重, 利用变权公式计算变权重。以安全性指标为例说明计算过程。将评价指标的基础数据分别代入不同等级的 x 条件梯形云发生器得到对应的隶属度向量如表 3 中隶属度向量列所示得到隶属度矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.623 & 0.368 & 0 \\ 0.137 & 0.863 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.005 & 0.9 & 0.095 & 0 \\ 0 & 0 & 0.089 & 0.911 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.3333 & 0.5 & 0.3333 & 0.5 & 0.3333 \\ 1 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0.3333 & 0.5 & 0.3333 \\ 3 & 2 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 0.5 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0.5 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

通过专家对基础指标打分得到对应指标值的得分如表 3 中得分列所示; 通过 10 位专家两两比较指标之间的重要性得到判断矩阵 A , 再利用相容矩阵分析法和 Matlab 软件计算得到权重 $W_1 = \{0.2, 0.2, 0.125, 0.125, 0.15, 0.1, 0.1\}$ 。利用此地区配电网的十组历史数据, 进行归一化处理去掉量纲的影响, 根据熵权法和反熵权确定权重的计算步骤并且利用 Matlab 软件计算得到熵权法确定的权重 $W_2 = \{0.16, 0.16, 0.155, 0.155, 0.13, 0.12, 0.12\}$ 和反熵权法确定的权重 $W_3 = \{0.21, 0.22, 0.12, 0.12, 0.13, 0.10, 0.10\}$ 。利用合作博弈法确定权重公式计算得到的权重 $W = \{0.1889, 0.1919, 0.1341, 0.1341, 0.1369, 0.1071, 0.1070\}$; 利用变权公式(4)对常权重 W 进行修正得到变权重 $W' = \{0.1945, 0.2520, 0.1094, 0.1094, 0.111, 0.1175, 0.1062\}$; 同理计算各个指标的常权重和变权重如表 4 所示; 利用式(5)和式(6)进行模糊化处理, 并计算得到安全性指标属性的评估向量 $B = W'R = \{0.0345, 0.2181, 0.2381, 0.1795, 0.3298\}$, 利用最大隶属度原则判别, 安全性指标属于优秀等级; 同理计算得到各指标层的评估向量和评价等级如表 5 所示。

从表 4 可知变权重不仅反映指标的重要程度, 而且反映指标数值与理想值之间的差距, 如经济性的组合权重是 0.1127, 而变权重是 0.0456, 可知经济性下的各指标数值未出现偏离正常值的情况, 而环保性和可持续性的组合权重是 0.1624, 变权重是

表 3 基础指标数据

Table 3 Index data

具体指标	数据	得分	隶属度向量	具体指标	数据	得分	隶属度向量
主变 N-1 通过率	0.76	79	(0,0,0.632,0.368,0)	线路 N-1 通过率	0.65	62	(0.137,0.863,0,0,0)
轻载线路比例	0.2	100	(0,0,0,0,1)	重载线路比例	0.18	100	(0,0,0,0,1)
变电容载比	1.81	100	(0,0,0,0,1)	线路联络率	0.8788	74	(0,0.005,0.9,0.095,0)
不同变电站联络比例	0.678	82	(0,0,0.089,0.911,0)	系统平均停电频率 (次/(户·年))	2.3672	41	(0.653,0.347,0,0,0)
系统平均停电持续 时间 h /(户·年)	3.7843	58	(0.506,0.494,0,0,0)	供电可靠率 RS3	0.99598	94	(0,0,0,0.123,0.887)
供电故障自愈率	0.65	75	(0,0.096,0.9,0.04,0)	架空线路故障停电率	0.087	96	(0,0,0,0.057,0.943)
电缆线路故障率	0.092	94	(0,0,0,0.071,0.929)	开关设备故障率	0.101	92	(0,0,0,0.338,0.662)
断路器开关故障停电率	0.056	97	(0,0,0,0.098,0.902)	变压器故障停电率	0.039	96	(0,0,0,0.083,0.917)
综合电压合格率	0.9677	95	(0,0,0,0.098,0.902)	平均三项不平衡率	0.0124	94	(0,0,0,0.076,0.9024)
频率合格率	0.989	93	(0,0,0,0.15,0.85)	谐波合格率	0.968	93	(0,0,0,0.107,0.893)
单位资产供电量($kw^{\circ}h$ /元)	100.09	72	(0,0.532,0.468,0,0)	电力弹性系数	0.13	61	(0.234,0.766,0,0,0)
线损率	0.0642	83	(0,0,0.137,0.863,0)	导线截面积合格率	0.938	92	(0,0,0,0.467,0.533)
配电自动化覆盖率	0.23	30	(0.876,0.124,0,0,0)	智能电表覆盖率	0.898	72	(0,0.453,0.547,0,0)
自动化终端覆盖率	0.79	63	(0.125,0.875,0,0,0)	故障自愈速度(分钟)	2.98	25	(0.854,0.146,0,0,0)
智能调度中心比例	0.1	10	(1,0,0,0,0)	通信可用率	0.9899	93	(0,0,0,0.198,0.812)
配变信息采集率	0.98	92	(0,0,0,0.21,0.79)	分布式能源接入率	0.014	8	(0.912,0.088,0,0,0)
分布式电源装机容量比例	0.117	10	(0.9,0.1,0,0,0)	清洁能源渗透率	0.103	11	(0.875,0.125,0,0,0)

表 4 指标权重

Table 4 Weights of index

确定权重的方法	第一层指标 W	安全性指标 W_1	优质性指标 W_2
合作博弈组合权重	{0.3165,0.2241,0.1127,0.1843,0.1624}	{0.1889,0.1919,0.1341,0.1341,0.1369,0.1071,0.1070}	{0.5582,0.4418}
变权	{0.1234,0.1179,0.0465,0.1735,0.5387}	{0.1945,0.2520,0.1094,0.1094,0.1110,0.1175,0.1062}	{0.71,0.29}
确定权重的方法	经济性指标 W_3	智能性指标 W_4	环保性和可持续性指标 W_5
合作博弈组合权重	{0.2090,0.1906,0.3549,0.2455}	{0.2368,0.09,0.1726,0.1803,0.08,0.12,0.1203}	{0.3143,0.3287,0.3570}
变权	{0.2237,0.2409,0.3290,0.2065}	{0.2657,0.0421,0.0922,0.2432,0.2692,0.0432,0.0444}	{0.3757,0.3141,0.3102}

表 5 评估向量

Table 5 Evaluation vectors

指标	梯形云模型的评估向量	最大隶属度判别状态
安全性 R_1	(0.0345,0.2181,0.2381,0.1795,0.3298)	优秀
优质性 R_2	(0,0,0,0.1191,0.8809)	优秀
经济性 R_3	(0.0564,0.3035,0.1498,0.3804,0.1101)	良好
智能性 R_4	(0.7212,0.1682,0.0230,0.0179,0.0702)	差
环保性和可持续 R_5	(0.8968,0.1032,0,0,0)	差
综合评估 R	(0.6151,0.1258,0.0403,0.0570,0.1619)	差

0.5387, 可知其属性下的各指标出现了偏离正常值的情况, 分布式能源接入率、分布电源装机容量比例、清洁能源渗透率都偏离正常值。

利用隶属度最大原则等级判别, 此地区的配电网在安全性方面处于“优秀”等级, 优质性方面处于“优秀”等级, 经济性方面处于“良好”等级, 智能性方面处于“差”等级, 环保性和可持续性方面处于“差”等级, 此地区的配电网综合评价结果

等级为“差”, 分析可知, 智能性、环保性和可持续性方面制约着此配电网的发展, 经调查发现, 此配电网中太阳能发电站、风力发电站较少, 有一部分用户仍然使用非智能电表, 购电方式单一等情况, 与评价结果相一致, 与此同时证明此配电网指标体系中的指标是具有显著性的, 此指标体系能从整体上体现配电网的主要特征, 满足系统性原则。此地区配电网应在智能性方面应提高故障自愈速度、加

大投入建设智能配电调度中心以及自动化终端;在环保性和可持续性方面,要大力发展太阳能光伏产业、新能源汽车、生物制产业、地热利用产业、沼气发电产业等。

5 结论

1) 配电网综合评价是一个复杂的过程,本文综合考虑影响配电网发展的各种因素并进行分类,分为安全性、优质性、经济性、智能性、环保性和可持续性,建立层次型配电网综合评价指标体系。

2) 采用合作博弈的方法确定各个指标的组合同权重,避免了单一权重确定方法导致的指标权重精确度变差,综合了相容矩阵分析法、熵权法、反熵权法这3种计算权重的优点。

3) 利用变权避免了个别指标数值严重偏离正常值时对配电网评价等级的影响。

4) 采用梯形云模型代替隶属度函数,用定量指标对配电网评价等级隶属度的计算,兼顾了配电网指标数据的不确定性和随机性。

参考文献

- [1] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2245-2252.
LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, et al. An assessment index system for power grid operation status and corresponding synthetic assessment method[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2245-2252.
- [2] 高赐威, 程浩忠, 王旭. 盲信息的模糊评价模型在电网规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 28-33.
GAO Ciwei, CHENG Haozhong, WANG Xu. The application of fuzzy evaluation of blind information in electric network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 28-33.
- [3] 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价中的应用[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 synthetic evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 56-60.
- [4] 张宇. 基于组合权重的配电网运行经济性模糊综合评价[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
ZHANG Yu. Economic fuzzy comprehensive evaluation for distribution network operation based on combinational weight[J]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [5] 张心洁, 葛少云, 刘洪, 等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 40-46.
ZHANG Xinjie, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46.
- [6] 卢志刚, 韩彦玲, 常磊. 基于组合权重的配电网运行经济性评价[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 1-5, 18.
LU Zhigang, HAN Yanling, CHANG Lei. The economic evaluation of the distribution system operation based on the combination weighing[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 1-5, 18.
- [7] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995(6): 15-20.
LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership cloud and membership cloud generator[J]. Computer Research and Development, 1995(6): 15-20.
- [8] 徐岩, 陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 88-93.
XU Yan, CHEN Xin. Transformer status assessment based on cooperative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 88-93.
- [9] 蒋建兵, 梁家荣, 江伟, 等. 梯形云模型在概念划分及提升中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(5): 1235-1237.
JIANG Jianbing, LIANG Jiarong, JIANG Wei, et al. Application of trapezium-cloud model in conception division and conception exaltation[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(5): 1235-1237.
- [10] 曲广龙, 杨洪耕. 基于梯形云模型的电能质量数据关联性挖掘方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 145-150.
QU Guanglong, YANG Honggeng. A correlation mining method for power quality data based on trapezoidal cloud model[J]. Automation of electric Power Systems, 2015, 39(7): 145-150.
- [11] 陈国伟, 刘景远, 滕海刚, 等. 基于本体和云模型的电能质量信息状态监测平台[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 55-61.
CHEN Guowei, LIU Jingyuan, TENG Haigang, et al. Power quality information status monitoring platform based on ontology and cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 55-61.
- [12] 宋人杰, 陈禹名. 基于变权系数的继电保护状态模糊综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 46-50.

- SONG Renjie, CHEN Yuming. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 46-50.
- [13] 卢志刚, 刘艳娥, 马丽叶, 等. 基于安全等级的电网最优安全经济域研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 210-218.
- LU Zhigang, LIU Yane, MA Liye, et al. The optimal security and economic region study based on the security hierarchy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 210-218.
- [14] 文旭, 颜伟, 王俊梅, 等. 计及节能风险评估的随机规划购电模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 193-201.
- WEN Xu, YAN Wei, WANG Junmei, et al. A stochastic programming power purchasing model considering energy-saving benefit risk assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 193-201.
- [15] 黄飞, 宋璇坤, 周晖, 等. 基于效果与基础互动的电网智能化水平综合评价指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 142-148.
- HUANG Fei, SONG Xuankun, ZHOU Hui, et al. Research on comprehensive evaluation index system of grid's intelligence level based on interaction between effect and basis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 142-148.
- [16] 韩柳, 李金超, 胡殿刚, 等. 基于超效率 DEA 模型的配电网智能化发展综合效率评价[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 102-107.
- HAN Liu, LI Jinchao, HU Diangang, et al. Development efficiency evaluation of distribution network intelligent planning based on super-efficient DEA[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 102-107.
- [17] 杨小彬, 李和明, 尹忠东, 等. 基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 146-150.
- YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150.
- [18] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 60-64.
- NIE Hongzhan, LÜ Pan, QIAO Yi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 60-64.
- [19] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [20] 周建国, 段三良. 烟气同时脱硫脱硝技术综合评价——基于博弈改进云模型[J]. 技术经济, 2009, 28(8): 66-71, 114.
- ZHOU Jianguo, DUAN Sanliang. Comprehensive evaluation on simultaneous removal of SO₂ and NO_x from flue gas: based on game theory and improving cloud model[J]. Technology Economic, 2009, 28(8): 66-71, 114.
- [21] 张锦春, 裘杭萍, 权冀川. 变权评估中均衡函数的构造[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(7): 107-110.
- ZHANG Jinchun, QIU Hangping, QUAN Jichuan. The construction of balance function in variable weight evaluation[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(7): 107-110.

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2017-03-01

作者简介:

宋人杰(1963—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为计算机在电力系统中的应用; E-mail: srj1963331@sina.com

丁江林(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用。E-mail: 1603475198@qq.com

(编辑 周金梅)