

DOI: 10.7667/PSPC170462

计及新能源特性的配电网评估指标及其隶属度函数的研究

李妍¹, 王洁¹, 王少荣¹, 陈峰², 郑旭², 唐靖²

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要: 为了评估新能源的出力波动性、间歇性以及分布特点对配电网的影响, 提出两类对新能源特性进行量化评估的指标和方法。新能源并网特性类指标包括出力波动性、分散度、线路(主变) $N-1$ 校验贡献率, 对新能源发电的并网品质、布局、形式进行了评估。配电网接纳能力类指标包括有效渗透率和电力平衡贡献度, 对新能源发电的并网规模和调峰作用进行了评估。为了确定适用的隶属度函数和对应的归一化值, 基于模糊综合评价法中专家打分法思想, 提出了“隶属度函数模型+评分表”的归一化方法。通过在随州配电网中的应用验证说明了所提指标及其归一化, 可以用来评价新能源发电接入方案对配电网的影响, 具有一定的工程实用价值。

关键词: 新能源; 接纳能力; 隶属度函数; 归一化

Research on evaluation indices of new energy generation characteristics and membership functions

LI Yan¹, WANG Jie¹, WANG Shaorong¹, CHEN Feng², ZHENG Xu², TANG Jing²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. SG HBEPC Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China)

Abstract: To evaluate the influence associated with new energy characteristics of power fluctuation, power intermittent and layout, two types of indices and method for evaluation of new energy generator's characteristic are established. Characteristic indices of new energy grid-connection include power fluctuation, disperse degree and test contribution degree of wiring or main transformer, which can evaluate generator's quality, layout and modality; the indices of grid accommodation capacity include effective permeability and power balance contribution degree, which can evaluate generator's scale and peak regulation effect. To get the applicable membership functions and corresponding normalization values, the specialist marking idea of fuzzy comprehensive evaluation method is used to improve the normalization method of "membership function model and marking form". The application in Suizhou grid shows scientificity of these indices and method, they are useful for guidance of new energy generation connection projects and grid planning, so they have engineered value.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800).

Key words: new energy; accommodation capacity; membership function; normalization

0 引言

随着环境问题的日益突出, 以环保和可再生为特质的新能源越来越得到各国的重视和大力推广。

基金项目: 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项资助(2017YFB0902800); 国网湖北省电力公司经研院“分布式电源对湖北配电网影响的综合评估体系研究”科技项目资助

针对大规模新能源分布式发电接入对配电网产生的影响^[1], 目前在经济性、技术性、可靠性、环境效益等方面开展了广泛的综合评估^[2-4]。文献[5]对风电、光伏发电接入带来的配电网潮流不确定问题进行研究; 文献[6]综合考虑了多主体经济效益, 研究了电源优化配置模型; 文献[7]考虑了新能源发电的调峰作用的配电网规划方法; 文献[8]对大规模并网友光电消纳容量的计算问题进行了讨论; 文献[9]重点对配电网接纳能力的主要影响因素进行了分析。可

再生能源中，目前技术最成熟、经济性最好的当属小水电^[10]；同时小水电具有良好的调节性能，配电网运营部门可根据当地能源条件，将小水电与风光能源联合调度，在低谷时段将风光发电利用小水电调节性存储起来，并在高峰时段将其转化成电能，实现更好的经济效益^[11]。对新能源接入配电网的影响进行评估时，由于用于评估不同方面影响的指标的量纲不同，为了保证结果的一致性，需要对指标值进行归一化^[12]，目前常用的指标归一化方法是模糊综合评价法，专家打分法和隶属度函数法都是属于模糊综合评价法里的概念，专家打分法可以很好地解决没有定量评价标准的指标的评估，但归一化结果却不可避免地存在主观性和离散性^[13]；隶属度函数实质上反映的是事物的渐变性的，但在实际应用中确定准确的函数却很困难。

为了全面体现新能源发电对配电网的影响，在相关研究基础上归纳出新能源发电并网特性和配电网的接纳能力两类评估指标，分析指标的含义并给出相应的计算方法，探讨了不同指标的归一化，提出对应的隶属度函数模型，基于模糊综合评价法中专家打分的思想提出“隶属度函数模型+评分表”的归一化方法。通过在湖北省随州配电网中的应用，对所提评估指标及其隶属度函数模型的实用性进行了验证说明。

1 评估指标及其隶属度函数模型的确定

本文将计及新能源特性的评估指标分为新能源发电并网特性和配电网接纳能力两类，具体指标如表 1 所示，同时，结合各指标的特点对其进行定性定量的分析，提出对应的隶属度函数模型。

表 1 计及 DG 特性的评估指标

Table 1 Evaluation indices of DG characteristics		
类别	指标	表征属性
并网特性	出力波动性 C_F	并网品质
	分散度 C_D	并网布局
	线路(主变) $N-1$ 校验 贡献率 C_{N-1}	并网形式
配电网接	有效渗透率 C_P	并网规模
纳能力	电力平衡贡献度 C_B	调峰作用

1.1 并网特性指标

并网特性指标主要反映新能源的出力特点和分布特点对配电网的影响，包括出力波动性 C_F 指标、分散度 C_D 指标、线路(主变) $N-1$ 校验贡献率 C_{N-1} 指标。其中，出力波动性指标反映了并网的品质，分散度指标反映了并网的布局，线路(主变) $N-1$ 校验

贡献率指标反映了并网形式。

1) 出力波动性 C_F 的定义及隶属度函数

出力波动性指标^[8]是在单步变化量 $\Delta P = P[(i+1)\cdot\Delta T] - P(i\cdot\Delta T)$ 和单步变化率 $k = \Delta P / P_N$ 基础上的定义^[18]，选取新能源出力的一个典型日分为 n 个时间间隔统计出力，计算公式为

$$C_F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \{P[(i+1)\times\Delta T] - P(i\times\Delta T)\}^2}}{P_N} \quad (1)$$

式中： ΔT 为基准时间间隔； i 表示该时刻对应的基准时间间隔数； $P(i\cdot\Delta T)$ 表示新能源发电前一时刻的实际出力； $P[(i+1)\cdot\Delta T]$ 表示新能源发电后一时刻的实际出力； P_N 表示新能源发电的额定功率。

文献[14]对某风电场在不同时间尺度下的出力变化率进行了统计分析，统计发现单个风电场的出力变化率很低仅为 0.2%~0.5%，且随着时间间隔的加大变化率的波动幅度也越来越大。大多数风电场位于电网末梢，且电网建设相对薄弱，容易引起电网电压稳定性问题。

通过以上分析，出力波动性指标的隶属度函数适合选择降半正态型，如图 1 所示，对应函数模型公式为式(2)。在 $(0, a)$ 段上的出力波动性对电力系统的影响不大，此时隶属度函数值为 1，参考 GBT 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》规定，如表 2 所示， a 点适宜小于 10%；超过该点后，函数值单调递减，但波动性最大不能超过 30%。

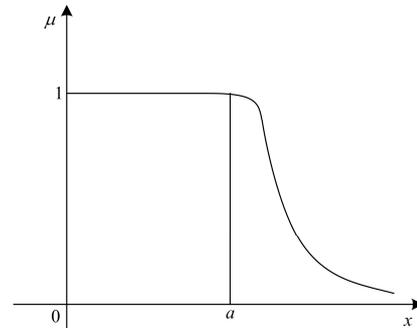


图 1 出力波动性隶属度函数模型

Fig. 1 Membership function model of power fluctuation

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \leq a \\ e^{-k(x-a)^2} & \text{当 } x > a, k > 0 \end{cases} \quad (2)$$

2) 分散度 C_D 的定义及隶属度函数

分散度指标用以反映装机总容量在各个电源的分配情况，计算公式为

$$C_D = \max \left| \frac{P_N - P_{\text{avg}}}{P_{\text{avg}}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中, P_{avg} 表示接入配电网的所有新能源的平均额定功率。

表 2 风电场有功功率变化最大值

Table 2 Max change of wind farm active power

风电场装机容量/MW	10 min 有功功率变化 最大限值/MW	1 min 有功功率变化 最大限值/MW
<30	10	3
30~150	装机容量 的 1/3	装机容量 的 1/10
>150	50	15

分散度是通过研究功率分布来定量的衡量新能源电源在配电网中的重要程度, 由式(3)可知, 该指标无量纲, 其值越小表示装机容量分布越均匀, 适宜就地消纳, 有利于配电网的安全稳定运行, 对应的隶属度函数值就越大。因此在分散度计算公式的基础上, 令该指标值为 x , 确定其隶属度函数为(4)所示。

$$u(x) = 1 - x \quad (4)$$

3) 线路(主变) $N-1$ 校验贡献率 C_{N-1} 的定义及隶属度函数

线路 $N-1$ 校验贡献率指标用来考察并网形式, 新能源接入的单辐射线路越多, 对线路 $N-1$ 校验贡献率就越大。确定指标计算公式为

$$C_{N-1} = \frac{N_{\text{DG}} + N}{N_{\text{all}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_{DG} 表示新能源接入提高了线路联络率的线路数量; N 表示配电网中已经通过 $N-1$ 校验的线路; N_{all} 表示配电网中运行的所有线路。

该指标计算公式为线性百分比形式, 且符合电网公司对线路 $N-1$ 的管理方式, 无需再进行指标值的归一化。在集中接入情景下, 一般直接接入变电站内汇流母线, 此时可以采用主变 $N-1$ 校验贡献率指标。

1.2 配电网接纳能力指标

配电网接纳能力指标包括有效渗透率 C_p 指标、电力平衡贡献度 C_b 指标。其中, 有效渗透率指标反映了本地消纳能力, 电力平衡贡献度指标反映了新能源发电的调峰作用。

1) 有效渗透率 C_p 的定义及隶属度函数

新能源发电的有效渗透率不仅和额定安装容量有关, 还和配电网短路容量以及当地负荷条件有关, 本文选取地区配电网某一个典型日的日均负荷和风

电日均发电功率, 通过有效渗透率的指标可以看出风电占配电网的供电比重, 计算公式

$$C_p = \frac{\sum P_{\text{DG}}}{P_{\text{load}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: P_{DG} 表示接入配电网的新能源发电的实际出力; P_{load} 表示配电网的实际负荷值, 当地配电网的短路容量大小会直接影响到该指标。

目前, 新能源发电具体接入工程呈现多样性, 并网形式有分散接入和集中接入, 并网点电压等级包括 380 V 及以下、10 kV、35 kV。其中, 依据并网潮流分布特性, 分散接入形式又可以分为点、线、面三类, 点、线接入形式可以在台区内实现消纳, 面接入形式是指并网到变电站汇流母线。具体确定隶属度函数模型的方法如下所述。

(1) 35 kV 集中接入时, 允许电力外送, 在本地消纳前提下, 多余电量电网全额收购上网。因此选取升半柯西型的隶属度函数模型, 如图 2 所示, 对应公式为式(7)。本文选取接入量超过 60% 是高比例接入, 确定隶属度函数的最大值点为(60%, 1)。

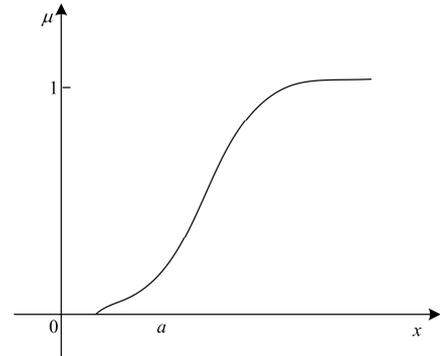


图 2 升半柯西型隶属度函数模型

Fig. 2 Membership function model of half-Cauchy distribution

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{当 } x \leq a \text{ 时} \\ \frac{1}{1 + \alpha(x-a)^\beta} & \text{当 } x > a, \alpha > 0, \beta < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 35 kV 及以下分散接入, 以接入点配电网就地消纳为主, 有效渗透率由负荷、新能源出力以及当地配电网结构决定, 隶属度函数选取正态型, 如图 3 所示, 对应的函数式为式(8)。

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-a)^2}{b}} \quad (b > 0) \quad (8)$$

2) 电力平衡贡献度 C_b 的定义及隶属度函数

选取全年最大负荷时刻进行电力平衡贡献度的研究, 通过该指标可以看出新能源在负荷高峰时期参与调峰的作用。负荷高峰电力平衡时刻选择午高

峰和晚高峰两种情景，取两者的最小值，计算公式为

$$C_B = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_{DG}}{P_{\text{午高峰}}}, \frac{\sum_{i=1}^n P_{DG}}{P_{\text{晚高峰}}} \right) \times 100\% \quad (9)$$

式中： $P_{\text{午高峰}}$ 、 $P_{\text{晚高峰}}$ 表示午高峰和晚高峰时刻的负荷。

隶属度函数选取正态型，如图 3 所示，其对应的函数模型为式(8)。当 $x \in (0, a)$ 时，在负荷高峰电力平衡中，新能源发电的出力越大，其对电力平衡的贡献度就越大，其对应的隶属度函数值就越大。

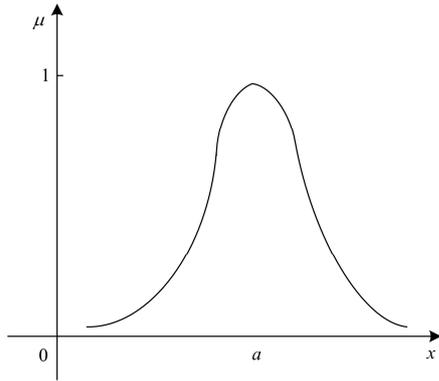


图 3 正态型隶属度函数模型

Fig. 3 Membership function model of normal distribution

2 “隶属度函数模型+评分表”的归一化方法

对于评估指标，尤其是没有明确指导标准值的非技术性的指标，很多情况下只能获得这个指标的变化趋势，假设评估指标值是 x ，其对应的评分是 y ，根据多组 (x, y) 可以确定任意指标值对应的评分，要获取多组 (x, y) 的准确数值在工程实际中比较困难。借鉴模糊评价法中专家打分法的思想，本文提出改进的“隶属度函数模型+评分表”的归一化方法，根据专家的实际经验给出模糊信息，通过评判打分的方法来确定一个 (x, y) 评分表，该评分反映了专家的经验积累。

实际应用中，提供当地配电网的资料，方便专家结合自己的经验给出评分表，甚至可以借助大数据的数据挖掘技术找出使得配电网安全、清洁、经济运行的最优的 (x, y) 。然后依据指标的定义及其性质选取合适的隶属度函数模型，结合多组 (x, y) 值进行线性拟合求解模型中的未知数。应用改进的“隶属度函数模型+评分表”归一化方法，以电压最大偏移指标为例进行隶属度函数求解如表 3 所示。

表 3 电压最大偏移评价表

Table 3 Score form of max voltage change	
节点电压最大偏移量	隶属度函数值
0~0.02	1
0.03	0.95
0.04	0.9
0.05	0.8
0.06	0.7
0.07	0.6

依据电压最大偏移指标的定义，结合技术标准的要求，电压最大偏移不能超过 0.07，选取函数模型为降半柯西型，其函数式为

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \leq a \text{ 时} \\ \frac{1}{1 + \alpha(x-a)^\beta} & \text{当 } x > a, \alpha > 0, \beta > 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (10)$$

其中有 3 个未知数，建立电压最大偏移的评价表，对表 3 进行线性拟合，得到 $\alpha = 171.2$ ， $\beta = 1.858$ ， $a = 0.02$ ，因此隶属度函数为式(11)。

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + [171.2(x - 0.02)]^{1.858}} & x > 0.02 \\ 1 & x \leq 0.02 \end{cases} \quad (11)$$

3 评估指标及其隶属度函数在湖北随州配电网中的应用

随州电网位于鄂西北电网与鄂东江北电网之间，网内没有大型火电厂和水电厂。在建设新能源电厂前，随州电网属于典型的受端电网，其特点是距主系统和负荷中心较远，网络结构相对薄弱，只能通过高压或超高压输电通道集中外送。随州市目前已被国家确立为“全国新能源发电示范基地”，随州规划建设 18 个风电站装机容量均接近 5 万 kW，规模较大的天河口风电站总装机达到 25 万 kW，目前一期装机 4.85 万 kW，天河口风电接入规划以 35 kV 专线接入为主，规划建设大型光伏电站包括：浙河马鞍山总装机达到 100 万 kW、广水市关庙镇总装机达到 100 万 kW、随县万和镇光伏电站总装机达到 100 万 kW，规划从 110 kV 接入；其余光伏项目以农村屋顶光伏为主，规模小，分散接入中低压配电网为主。基于随州地区风能和太阳能资源的地理分布特点以及新能源发电在随州配电网存在“点、线、面”多种并网方式，对于开展新能源并网对配电网的影响研究具有代表性。下文在湖北省随州配电网中的应用对所提评估指标及其隶属度函数模型的实用性进行分析说明。

1) 出力波动性 C_F

由于随州风电规模大, 出力波动性的影响较为显著。选取随州市正在运行的风电场某一个典型日出力进行出力波动性计算, 图 4 为小时级时间尺度上统计的出力波动性曲线, 计算结果为

$$C_F = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{P[(i+1) \times \Delta T] - P(i \times \Delta T)\}^2}{n}}}{P_N} = \frac{\sqrt{\frac{0.097258}{24}}}{1} = 0.064$$

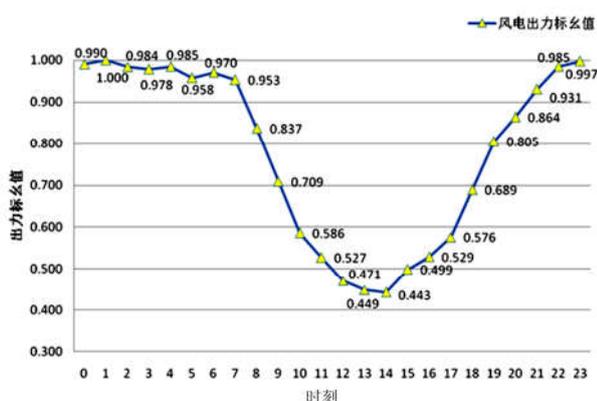


图 4 风电典型日出力特性曲线

Fig. 4 Typical wind daily power characteristic curve

依据前文确定的出力波动性的要求值, 建立评分表 4, 解得 $a=0.1$, $k=12.77$, 得到出力波动性的隶属度函数为式(12)。

表 4 小时级出力波动性的评分表

Table 4 Score form of power fluctuation per hour

出力波动性	隶属度函数值
$\leq 10\%$	1
10%~30%	1~0.6
30%	0.6

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{当 } x \leq 0.1 \\ e^{-12.77(x-0.1)^2} & \text{当 } x > 0.1 \end{cases} \quad (12)$$

所以归一化值 $\mu(0.064) = 1$ 。

2) 分散度 C_D

从随州新能源的规划建设规模来看, 风电电站装机容量都接近在 5 万 kW; 一般采用专线并网方式; 因此在进行分散度计算时, 风电和光伏应该分别考虑。风电额定功率和平均功率的差值基本为零; 分散度指标估算为零。不考虑大规模光伏电站, 分散接入的分布式光伏规模很小, 基本可以在接入点就地消纳。在按照式(3)进行计算时, 低压分散接入

的分布式电源难以收集统计完整, 参考湖北省分布式电源规划数据并考虑到随州分散接入的分布式电源规模相对很小的具体情况, 此处光伏分散度指标估算为零, $\mu=1$ 。

3) 主变 $N-1$ 校验贡献率 C_{N-1}

查看随州市《配电网规划报告》, 可知现状电网中有单线单变变电站 5 座, 通过“ $N-1$ ”校验的主变有 36 台, 风电接入到单台主变的烈山变后, 提高了主变 $N-1$ 的通过率, 故可计算

$$C_{N-1} = \frac{1+36}{41} \times 100\% = 90.24\%$$

4) 有效渗透率 C_p

随州市配电网 2014 年日均负荷 34.99 万 kW, 目前风电日均出力为 21.43 万 kW, 故可计算:

$$C_p = \frac{\sum P_{DG}}{P_{load}} \times 100\% = \frac{21.43}{34.99} \times 100\% = 61.25\%$$

天河口水电站一期装机容量 4.86 万 kW, 凤鸣风电场装机容量 4.95 万 kW; 规划接入 35kV 电压等级, 风电出力满足本地负荷的前提下具备电力外送的能力, 因此针对随州配电网评估有效渗透率, 应该按照图 2 隶属度函数选取。

2015 年 4 月, 发改委能源研究所发布“中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究”, 到 2050 年全国发电装机规模将达到 56.2 亿 kW 到 65.4 亿 kW, 其中可再生能源发电装机规模达到 36.2 亿 kW 到 46.4 亿 kW, 占全国总装机的 64%~71%。结合前文所述, 建立有效渗透率的评分表, 对表 5 进行线性拟合, 解得 $a=0.026$, $b=-2.035$, $c=0$, 得到隶属度函数为式(13)。

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{当 } x \leq 0 \\ \frac{1}{1+0.026x^{-2.035}} & \text{当 } x > 0 \end{cases} \quad (13)$$

所以归一化值 $\mu(0.6125) = 1$ 。

表 5 有效渗透率的评分表

Table 5 Score form of effective permeability

有效渗透率	隶属度函数值
20%	0.6
40%	0.8
50%	0.9
$\geq 60\%$	1

5) 电力平衡贡献度 C_B

截至 2014 年末, 随州市风电装机规模 27.48 万 kW, 风电发电量 4.85 亿 kWh。根据随州市配电网近年来负荷特性情况, 全年最大负荷时刻一般发生在夏季 8 月份某日 21 点左右, 本次电力平衡贡献度

研究考虑两种情况，第一种情况在该市全网进行午高峰电力平衡，由于目前光伏发电装机容量相对很小，此处主要考虑风电。按照特性曲线，风电总出力取 50%。第二种情况是在该市全网进行晚高峰电力平衡，风电总出力取 80%，计算结果为

$$C_B = \min \left(\frac{50\% \times \sum_{i=1}^n P_{\text{风}}}{P_{\text{午高峰}}}, \frac{80\% \times \sum_{i=1}^n P_{\text{风}}}{P_{\text{晚高峰}}} \right) = \min \left(\frac{13.74}{50.56}, \frac{21.98}{63.2} \right) = 27.17\%$$

结合上文电力平衡贡献度隶属度函数模型选取为正态型，建立电力平衡贡献度的评分表(表 6)，解得 $a=0.4$ ， $b=0.49$ ，得到隶属度函数为

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-0.4)^2}{0.49}} \quad (14)$$

所以 $\mu(27.17\%) = 0.93$ 。

表 6 电力平衡贡献度的评分表

Table 6 Score form of power balance contribution degree

电力平衡贡献度	隶属度函数值
5%	0.60
≥40%	1

6) 随州配电网评估指标及其归一化结果汇总

本文提出了计及新能源特性的评估指标并讨论了基于隶属度函数的归一化方法，结合随州配电网规划报告及新能源发电的规划情况，以 2014 年电网为基础年进行综合评估，各指标及其归一化结果(详见表 7)直观体现新能源特性对随州电网的影响程度。就具体的指标评估结果来看，新能源并网品质指标好；由于目前低压接入的新能源分散度指标归一化后可以取值为 1，说明本地消纳均衡；提高了主变 N-1 的校验通过率，有利于提高随州电网供电可靠性。该市配电网中的两座风场接入 35 kV 电压等级，具备外送的能力，在电网全额收购上网的前提下，有效渗透率归一化结果为 1；通过对该市全网进行午高峰和晚高峰电力平衡，说明随州电网的新能源对负荷高峰时期的电力平衡起到了很好的支撑作用。

表 7 指标值及归一化结果

Table 7 Evaluation values and standardized results

类别	指标	随州市配电网指标值	归一化值
并网特性	出力波动性	0.064	1
	分散度	0	1
	主变 N-1 校验贡献率	90.24%	0.902 4
接纳能力	有效渗透率	61.25%	1
	电力平衡贡献度	27.17%	0.93

4 结论

本文针对新能源特性及其对配电网的影响两个方面提出了配电网评估指标，并提出改进的“隶属度函数模型+评分表”的归一化方法，结合随州新能源“点线面”典型接入共存的实际情况，对评估指标以及隶属度函数的确定方法进行具体说明，具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电对配电网影响的综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 132-140.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. The integrated evaluation of impact of distributed generation on distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 132-140.
- [2] 陈力, 胡钊, 卫敬宜, 等. 一种新的光伏并网评价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 105-110.
CHEN Li, HU Po, WEI Jingyi, et al. A new evaluation system of grid-integrated PV generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 105-110.
- [3] 刘故帅, 肖异瑶, 贺禹强, 等. 考虑新能源类型的电力系统多目标并网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 31-37.
LIU Gushuai, XIAO Yiyao, HE Yuqiang, et al. Multi-objective optimal method considering types of grid connected new energy of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 31-37.
- [4] V. Dabra, K. K. Paliwal, P. Sharma, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-11.
- [5] 廖迎春, 甘德强, 陈星莺, 等. 考虑分布式电源出力不确定性的城市电网模糊最优潮流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 35-39.
LIAO Yingchen, GAN Deqiang, CHEN Xingying, et al. Fuzzy optimal power flow analysis considering indeterminacy of distributed generation for urban power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 35-39.
- [6] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research

- on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [7] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬, 等. 考虑分布式电源调峰的配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 12-15.
OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Distribution network planning considering DG for peak shaving[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 12-15.
- [8] 欧阳聪, 刘明波. 考虑网络传输约束的并网光伏发电消纳容量计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 17-23.
OUYANG Cong, LIU Mingbo. Computing of accommodation capacity of grid-integrated photovoltaic generation considering network's transmission constraints. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 17-23.
- [9] 王守相, 葛磊蛟, 张齐, 等. 配电网分布式能源接纳能力影响因素分析[J]. 供用电, 2016, 33(4): 2-7.
WANG Shouxiang, GE Leijiao, ZHANG Qi, et al. Impact factor analysis of distributed energy accommodation capacity for distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(4): 2-7.
- [10] 蹇超. 恩施小水电接入电网的运行控制方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
JIAN Chao. Research on operation control method of connecting small hydropower station to the grid in Enshi[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [11] 王虎心. 小水电与风光并网的经济效益和环境效益研究[J]. 科技创新与应用, 2016(3): 199.
WANG Huxin. Research on the economic and environmental benefits of integrated grid consists of small hydropower stations and wind power and PV generation[J]. Innovation and Application of Science and Technology, 2016(3): 199.
- [12] 李光, 吴祈宗. 基于结论一致的综合评价数据标准化研究[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(3): 72-77.
LI Guang, WU Qizong. Research on data standardization in comprehensive evaluation based on consistent result[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(3): 72-77.
- [13] 刘学毅. 德尔菲法在交叉学科研究评价中的运用[J]. 西南交通大学学报(社会科学版), 2007, 8(2): 21-25.
LIU Xueyi. Delphi technique in the assessment of interdisciplinary research[J]. Journal of Southwest Jiaotong University (Social Sciences), 2007, 8(2): 21-25.
- [14] 徐超. 风电监测信息海量数据挖掘与特性信息提取[D]. 济南: 山东大学, 2015.
XU Chao. Data mining and feature extraction of massive wind monitoring information[D]. Ji'nan: Shandong University, 2015.

收稿日期: 2017-03-31; 修回日期: 2017-11-02

作者简介:

李妍(1971-), 女, 工学博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为配电网规划与运行控制、分布式发电、电力系统运行分析等; E-mail: liyanhust@hust.edu.cn

王洁(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与评估、输电线路设计; E-mail: 583205291@qq.com

王少荣(1960-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电网规划、配电网智能监控与评估、电力系统巡视及检测机器人等。

(编辑 张爱琴)