

DOI: 10.7667/PSPC171641

# 基于综合权重理论和 Fuzzy-TOPSIS 综合评价的 电网静态电压稳定性分析

武家辉<sup>1</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 王海云<sup>1</sup>, 张强<sup>2</sup>, 宋昆峰<sup>3</sup>, 王翠翠<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 国网新疆电力公司乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 随着电网建设规模的不断扩大与结构日益复杂, 电网电压安全稳定问题日益突出。探讨了一种静态电压稳定性指标综合辨识方法。首先, 针对以往单一评估指标而导致的评估结果差异性, 采用六种静态电压稳定性指标来表征节点电压稳定性。其次, 对指标权重系数进行优化, 分析指标权重不确定性因素, 引入信息熵与层次分析法计算指标综合权重。同时以综合评价价值最大和评价价值偏离度最小为目标, 构建拉格朗日函数优化权重系数; 并采用 Fuzzy-TOPSIS 对计算结果进行排序。最后选用哈密地区部分电网作为案例, 分别计算单一指标与所提的综合指标辨识系统稳定与薄弱母线, 验证所提方法的有效性与客观性。所得结果可以为系统运行规划, 无功补偿等提供依据。

**关键词:** AHP; 熵权法; Fuzzy-TOPSIS; 静态电压稳定性指标; 电压薄弱点

## Static voltage stability analysis of power grid based on comprehensive weight evaluation method and fuzzy-TOPSIS

WU Jiahui<sup>1</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, WANG Haiyun<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, SONG Kunfeng<sup>3</sup>, WANG Cuicui<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China; 3. State Grid Xinjiang Urumqi Electric Power Company, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** The problems of voltage security and stability of power grid are becoming more and more prominent with the expansion of power grid and the complexity of structure construction. As a result, this paper discusses a new method for static voltage stability analysis. Firstly, in order to overcome the sidedness limitation of single-index system in the evaluation of voltage stability, six kinds of voltage stability indexes are combined. Secondly, an index weight optimization method is calculated based on uncertainty factor and a comprehensive evaluation method is used which combines analytic hierarchy process method and entropy method to calculate the weight values. Meanwhile, the aim of the optimization of weights coefficient is to maximize the value of the comprehensive evaluation and minimize the degree of deviation at the same time by using Lagrange conditioned extreme value method, and Fuzzy-TOPSIS is used to rank the results. Finally, taking Hami grid as a study case, both single index and comprehensive index for static voltage stability identification are compared to verify the effectiveness and objectivity of the proposed method. The obtained results can be used to provide basis for system operation scheduling and reactive power compensation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51667020), Key Laboratory Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2016D03021) and Doctoral Innovation Project (No. XJUBSCX-2015015).

**Key words:** analytic hierarchy process (AHP) method; entropy weight method; Fuzzy-TOPSIS; voltage stability index; weak bus of voltage

## 0 引言

随着我国经济与社会的快速发展, 电力系统互

联程度不断增强, 电网结构愈趋复杂, 尤其是风电等新能源的大规模接入之后, 电力系统的安全稳定问题日益凸显<sup>[1-3]</sup>。如何衡量大电网安全状态, 比较不同地区的电网电压稳定性水平, 对电网整体发展至关重要。通过对电力系统静态电压稳定水平的评估, 可以得出系统安全稳定裕度; 为电力调度、决策和制定防止电压失稳崩溃方案提供理论依据。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51667020); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题资助(2016D03021); 博士创新项目资助(XJUBSCX-2015015)

传统电力系统静态电压稳定性分析方法有模态分析法<sup>[4]</sup>，灵敏度分析法<sup>[5]</sup>，数值仿真方法、解析法等。传统电力系统静态电压稳定性评估通常只强调某单一或两个属性。例如文献[6]基于局部量测数据和负荷静态特性，提出了一种可在线应用的节点静态电压稳定性指标，即节点电压稳定指标 VSI 来判别系统稳定性。文献[7]提出了一种基于 L 指标的静态电压无功协调控制策略。文献[8]通过求取风电场接入电网后的 P/V 和 Q/V 曲线得到灵敏度指标和无功裕度指标，提出了一种用于评估系统静态电压稳定性的双重电压稳定指标。然而对庞大复杂的电力系统而言，对电力系统稳定性的某几个特征或者某一部分评估都不足以反映其整体的安全、稳定状态。需要借助建立一种多角度，多层次的指标体系的综合评价方法，从宏观上对电网电压安全运行状态进行整体评价。综合评价理论(CET)是解决这一问题有效方法。

CET 是对多属性体系结构做出全局性的描述的一种评价方法，即根据所给的条件，对评价对象的整体，采用不同的评价方法给每个评价对象赋予一个评价价值，再根据评价价值进行排序或择优。CET 已被广泛应用于配电网、微电网、输电线路等的稳定性、经济性分析中<sup>[9]</sup>。文献[10-11]运用基于模糊理论的综合评价法分别对输电线路运行状态和高阻抗变压器的应用价值进行了评价。文献[12]采用可靠性、经济性和适应性这 3 个准则，建立了交、直流微电网综合评估指标体系。文献[13]采用德尔菲建立统一标准的指标权重，形成了涵盖高、中压配电网的城市配电网综合评价体系。但是目前尚未有文献对电网静态安全稳定做出全面的综合评价。

本文提出一种静态电压稳定综合评价方法，构建了三个层次、六种电网静态电压稳定性指标体系，解决了单一评估指标不全面的问题；采用主客观相结合的权重算法，同时以综合评价价值最大和评价价值偏离度最小为目标，构建拉格朗日函数优化权重系数。最后应用模糊逼近理想解排序(Fuzzy-TOPSIS)对所建立的评价系统进行综合排序，分别应用单指标与综合指标分析电力系统静态电压的稳定节点与薄弱节点，所得结果可以为系统运行调度，无功补偿等提供依据。

## 1 电力系统静态电压稳定性指标体系组成

### 1.1 静态电压稳定性指标体系组成

电力系统静态电压稳定性指标之间具有强耦合性、强系统性与复杂性的特点，给指标体系构建

带来了困难。建立指标体系应当遵循科学性、针对性和系统性的原则，以确保指标体系的评价结构的合理和可行<sup>[14-15]</sup>。技术指标一般从常规性研究中取得，例如静态电压稳定性分析方法包括有功/电压曲线法(P/V)、无功/电压曲线法(Q/V)、灵敏度分析、模态分析等方法。以上每种方法可以产生不同类型的静态电压稳定性指标，再根据指标体系的构建原则以及各类静态电压稳定性指标间关系，可构建出图 1 所示的指标体系。

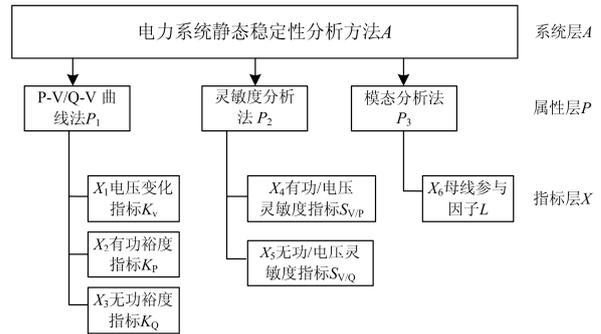


图 1 静态电压稳定性指标体系

Fig. 1 Static voltage stability index system

该体系包含三个层次，即系统层 A、属性层 P 以及指标层 X，其中属性层 P 代表了三种静态电压稳定性分析方法。P<sub>1</sub> 方法可以提供三个静态电压稳定性指标(X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>)；P<sub>2</sub> 方法提供两个静态电压稳定性指标(X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub>)；P<sub>3</sub> 方法提供一个静态电压稳定性指标(X<sub>6</sub>)。

### 1.2 指标的符号定义与无量纲化

设  $x_{ij}$  为第  $j$  个系统中第  $i$  项指标的观测值。 $m$  个被评价对象对应于  $n$  个评价指标的指标值构成指标矩阵  $\mathbf{X}$ ，如式(1)所示。

$$\mathbf{X} = \begin{matrix} & \begin{matrix} P_1 & P_2 & \cdots & P_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

$$x_{ij}^* = \begin{cases} x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} & (a) \\ \sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2} / x_{ij} & (b) \end{cases} \quad (2)$$

由于各指标具有不同的量纲及数值量级差别，需要将指标无量纲化处理。采用向量规范法对评价指标进行无量纲化，见式(2)。向量规范法的特点是当  $x_{ij} \geq 0$  时， $x_{ij} \in (0, 1)$ ，无固定的最大、最小值，

且  $\sum_i^n (x_{ij}^*)^2 = 1$ 。其中式(2a)应用于效益型指标无量纲化, 即指标越大越好; 式(2b)应用于成本型指标无量纲化, 即指标越小越好。

## 2 综合权重计算与优化

### 2.1 综合权重计算

权重系数的计算方法是综合评价问题中的核心问题, 同时也是实用性很强的一类问题。评价指标体系组成主要取决于指标间的重要程度与相关性。由于指标间存在着不确定性, 使得评价指标的权重存在着相应的不确定性。常采用信息熵<sup>[16]</sup>对指标权重的不确定性进行客观描述。但是由于信息熵只强调信息的差异性与不确定性, 本文采用层次分析法(AHP)对客观权重进行主观修正, 不仅可以降低评价指标的不确定因素, 而且可以简化系统计算与分析, 有助于决策者保持其思维过程和决策过程原则的一致性。计算过程如图 2 所示, 具体分为以下 8 个步骤。

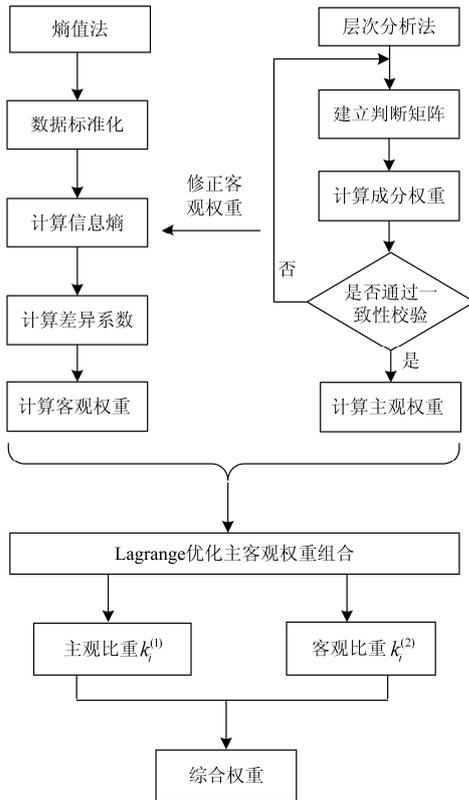


图 2 综合权重计算流程

Fig. 2 Progress of calculating comprehensive weights

1) 计算第  $j$  项指标下, 第  $i$  个被评价对象的特征值比重  $Pro_{ij}$ ,  $Pro_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$ , 假设  $x_{ij} \geq 0$ , 且

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \geq 0, (i=1, 2, 3, \dots, n; j=1, 2, 3, \dots, m)。$$

2) 计算第  $j$  项指标的熵值

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

式中:  $k > 0$  且  $k = 1/\ln n$ ;  $e_j > 0$ 。

3) 计算  $j$  项指标的差异系数

$$g_j = 1 - e_j \quad (4)$$

差异系数  $g_j$  越大, 表明该项指标的作用越大。

4) 计算  $j$  项指标的客观权重系数为

$$q_j = g_j / \sum_{i=1}^m g_j \quad (5)$$

5) 确定系统中各元素的决策层次之间的关系, 构建判断矩阵。判断矩阵  $A = [a_{ij}]$ ,  $a_{ij}$  为子目标  $i$  相对于子目标  $j$  的重要程度, 且  $a_{ij} > 0, a_{ii} = 1, a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。其中  $a_{ij}$  的赋值可以根据专家经验确定, 其赋值大小参考文献[17]。

6) 求主观权重。求判断矩阵  $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ , 最大特征值对应的特征向量归一化后即为首求得主观权重  $p_j$ 。

$$AP_j = \lambda_{\max} P_j \quad (6)$$

7) 一致性检验。衡量判断矩阵一致性的指标  $C_R$  可表示为

$$C_R = \frac{\lambda_{\max} - n}{\gamma_n (n-1)} \quad (7)$$

式中:  $n$  为判断矩阵的阶数;  $\gamma_n$  为判断矩阵阶数相对应的修正值。同时根据文献[17], 如果该判断矩阵的一致性指标  $C_R < 0$ , 则表明其一致性可以接受, 进入下一步; 反之, 则需重新对子目标进行两两比较判断, 直至判断矩阵通过一致性检验。

8) 计算综合权重。由前述可知  $p_j, q_j$  分别是主观权重与客观权重的系数, 设  $\omega_j$  为具有主客观信息集成特征的权重系数。

$$\omega_j = k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j \quad (8)$$

式中,  $k_i^{(1)}$ 、 $k_i^{(2)}$  为待定常数且满足规范条件  $k_i^{(1)} > 0, k_i^{(2)} > 0$ , 且  $(k_i^{(1)})^2 + (k_i^{(2)})^2 = 1$ 。

### 2.2 综合权重优化

对于电网来说, 各指标的主、客观重要程度对系统的影响程度是不同的, 但是大多数研究对主客观赋值均为 0.5<sup>[18-19]</sup>。本文采用 Lagrange 优化主、客观权重的比重, 能使评价结果更加准确。设被评

价对象  $x_{ij}$  的综合评价值为

$$y_i = \sum_{j=1}^m \omega_j x_{ij} = \sum_{j=1}^m (k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j) x_{ij} \quad (9)$$

多指标评价实质是对不同评价对象的综合评价价值进行排序,  $y_j$  越大, 其所对应的方案越优。同时, 由于指标的真实权重属于一个随机变量, 可以表述成一个均值与随机误差之和。通过式(10)得到的  $n$  组权重可看作真实权重的一次随机抽样抽取的子样, 从最小偏差的角度出发, 设方案  $y_j$  的综合评价值的偏离度为

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^m ((\omega_j - \omega_j^i) x_{ij})^2, (i=1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

想要确定  $k_i^{(1)}$ 、 $k_i^{(2)}$  的值, 就要使得  $\sum_{i=1}^n y_i$  取值

最大, 同时  $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i$  最小。为了同时达到综合评价值最大和评价值偏离度最小的目的, 联立式(9)和式(10)可得

$$\begin{cases} \max \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) = \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_j x_{ij} \\ \min \left( \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \right) = \min \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\omega_j - \omega_j^i) x_{ij} \right)^2 \\ 0 \leq \omega_j \leq 1 (j=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)的多目标优化问题转化为单目标优化问题, 即

$$\begin{cases} \min \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(\omega_j - \omega_j^i) x_{ij}]^2 + (1-\lambda) \max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \omega_j x_{ij} \\ 0 \leq \omega_j \leq 1 (j=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\lambda$  为平衡系数。在满足  $k_i^{(1)} > 0, k_i^{(2)} > 0, (k_i^{(1)})^2 + (k_i^{(2)})^2 = 1$  的条件下应用 Lagrange, 得

$$\begin{aligned} L(k_i^{(1)}, k_i^{(2)}, \mu) = & \lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \left( \frac{(k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j) - (k_i^{(1)} p_j^i + k_i^{(2)} q_j^i)}{(k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j)} \right) x_{ij} \right]^2 + \\ & (1-\lambda) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j) x_{ij} - \mu \left( (k_i^{(1)})^2 + (k_i^{(2)})^2 - 1 \right) \end{aligned} \quad (13)$$

该方程存在极值的必要条件, 分别对  $k_i^{(1)}$ 、 $k_i^{(2)}$ 、 $\mu$  求偏导可得

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial k_i^{(1)}} = 2\lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \left( \frac{(k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j) - (k_i^{(1)} p_j^i + k_i^{(2)} q_j^i)}{(k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j)} \right) x_{ij} \right] \times \\ \left( p_j - p_j^i \right) x_{ij} + (1-\lambda) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_j x_{ij} - 2\mu k_i^{(1)} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial k_i^{(2)}} = 2\lambda \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \left( \frac{(k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j) - (k_i^{(1)} p_j^i + k_i^{(2)} q_j^i)}{(k_i^{(1)} p_j + k_i^{(2)} q_j)} \right) x_{ij} \right] \times \\ \left( q_j - q_j^i \right) x_{ij} + (1-\lambda) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_j x_{ij} - 2\mu k_i^{(2)} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu} = 1 - \left( (k_i^{(1)})^2 + (k_i^{(2)})^2 \right) = 0 \\ k_i^{(1)} > 0, k_i^{(2)} > 0, (k_i^{(1)})^2 + (k_i^{(2)})^2 = 1 \end{cases} \quad (14)$$

方程组(14)由  $3n+1$  个方程组组成, 共有  $3n+1$  个变量。采用 Matlab 求解该方程组, 得到设计方案技术指标权重的系数  $k_i^{(1)}$ 、 $k_i^{(2)}$ 。将该权重系数代入式(8)可得到各设计方案的综合权重。综合赋权法以客观赋权法为基础, 通过主观赋权对各个指标的权重进行修正, 同时优化主客观权重的比重, 因此综合赋权法结合了主客观赋权法的特点, 具有一定客观实用性。至此, 建立了权重系数的计算方法, 从而可确定由三个层次、六种静态电压稳定性指标体系的权重系数, 然后运用 Fuzzy-TOPSIS 模型计算最终评价价值。

### 3 Fuzzy-TOPSIS 综合评价模型建立

模糊逼近理想解排序法(Fuzzy-TOPSIS)是一种有限方案多属性决策方法<sup>[20]</sup>。该方法是通过多属性问题的正理想解和负理想解对方案集矩阵  $\mathbf{Y}$  中各方案进行排序, 计算过程如下。

1) 选取 6 个静态电压稳定性指标特性构建评估因素集  $P = \{P_i\}$  作为主准则层, 再将特征因素集按属性细分为子评估因素集  $X_i$ , 即  $X = \{X_i\}$ ; 其次定义评价模型的评语集:  $V = \{V_L, V_M, V_H\}$ , 其中  $V_L$  表示差,  $V_M$  表示一般,  $V_H$  表示好。把准则层因素集  $P_i$  与子评估因素集  $X_i$  到评语集  $V$  看作模糊映射, 从而确定模糊评估矩阵  $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{m \times n}$ 。隶属度的确定对于 Fuzzy-TOPSIS 法来说十分重要<sup>[21-23]</sup>, 本文采用三角隶属函数, 表达式见式(15)。其中  $x$  表示定量指标的实际数值,  $\partial^L$ 、 $\partial^M$  和  $\partial^H$  分别表示第  $i$  个评语等级的区间范围值, 且  $\partial^L < \partial^M < \partial^H$ 。

$$r_{ij}(V) = \begin{cases} 0, x > \partial^L \\ \frac{x - \partial^L}{\partial^M - \partial^L}, \partial^L \leq x < \partial^M \\ \frac{\partial^H - x}{\partial^H - \partial^M}, \partial^M \leq x < \partial^H \\ 0, x > \partial^H \end{cases} \quad (15)$$

2) 根据模糊评判理论, 运用模糊矩阵的合成运算, 得到矩阵

$$Y = R_i(\cdot, +)\omega_{(j)} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中:  $\omega_j$  为综合权重;  $y_{ij} \geq 0$ ,  $y_{ij} \in (0, 1)$ 。

3) 确定待评价方案集合。确定正理想解  $Y^+$  和负理想解  $Y^-$ 。假设  $Y^+$  和  $Y^-$  对应的属性向量  $y_i^+$  和  $y_i^-$  可表述为

$$Y^+ = \left\{ (y_{ij}^{\max} | j \in J), (y_{ij}^{\min} | j \in J'), i = 1, 2, \dots, n \right\} = \{y_1^+, y_2^+, \dots, y_j^+, \dots, y_m^+\} \quad (17)$$

$$Y^- = \left\{ (y_{ij}^{\min} | j \in J), (y_{ij}^{\max} | j \in J'), i = 1, 2, \dots, n \right\} = \{y_1^-, y_2^-, \dots, y_j^-, \dots, y_m^-\} \quad (18)$$

第  $j$  个评价对象的第  $i$  项评价指标值越高, 意味着它的相应性能越优; 反之, 则只需将上式中和的位置相互交换即可。其中,  $n$  为评价指标的数量,  $m$  为评价对象的数量。

4) 考虑各项评价指标对应的综合权重, 分别计算各评价对象  $y_{ij}$  到正理想解  $Y^+$  和负理想解  $Y^-$  的欧氏距离。评价对象到  $Y^+$ 、 $Y^-$  的欧氏距离  $D_i^+$ 、 $D_i^-$  可表示为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_j^+ - y_{ij})^2} \quad (19)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_j^- - y_{ij})^2} \quad (20)$$

5) 计算各评价对象到正理想解  $Y^+$  的相对距离。评价对象  $y_{ij}$  到正理想解  $Y^+$  的相对距离  $C_i$  可表示为

$$C_i = \frac{D_i^+}{D_i^- + D_i^+} \quad (21)$$

式中,  $0 \leq C_i \leq 1$ , 而  $C_i$  即可作为评价对象  $y_{ij}$  在评价对象集合中所对应的综合评价价值。由前述可知, 该指标值越高, 说明评价对象越优越。

## 4 算例分析

选用哈密地区部分电网作为案例, 应用本文方法对该地区的现状电网进行静态电压稳定性分析评价, 找到该地区电网电压薄弱点与稳定点, 进一步说明应用本文的方法对电网进行评价时的具体步骤。

### 4.1 哈密电网概况与数据预处理

本节以哈密地区哈郑直流附近的 750 kV 电网为研究对象, 如图 3 所示。由于较火电厂而言, 风电接入地区多为电压薄弱点, 因此本文重点分析该地区风电接入附近的电压稳定性。哈密地区电网是典型的风电集中式电网, 该地区风资源充裕, 风电机组以各个风电场为单位由 35 kV 电压等级接入风电汇集站, 再由 220 kV 母线统一汇入主网架。图 3 中哈密北风区包含 6 个主要风电场群, 分别是麻黄沟西、麻黄沟东、望阳台、望阳台东、望阳台西与红星; 哈密中部地区主要包含 3 个风电场群, 分别是十三间房、淖毛湖和广汇淖毛湖; 哈密东南风区包含 5 个主要风电场, 分别是烟墩南、烟墩北、烟墩西、苦水西与苦水东。

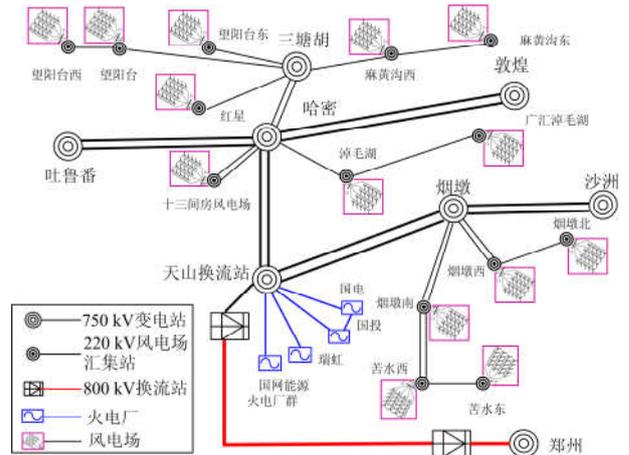


图 3 哈密部分电网的示意图

Fig. 3 Sectional power grid of Hami

对所建立模型进行潮流计算与模态分析, 计算最小特征值下的风电并网母线(220 kV)参与因子, 可以分别得灵敏度指标、母线参与因子以及有功、无功功率裕度和电压裕度等数据。其中有功裕度与无功裕度是效益型指标, 即指标越大越稳定, 其余指标为成本型指标, 即指标越小越稳定。运用公式(2)对所有指标进行无量纲化, 并将成本型指标转换为效益型指标, 得出指标无量纲化矩阵, 见式(22)。由 1.2 节可知,  $m$  代表评价对象的个数,  $n$  代表评价指标的个数, 矩阵(22)共有 14 行, 6 列, 分别代表

14 个风电场与 6 种静态电压稳定性指标。

$$x^* = \begin{bmatrix} 0.1579 & 0.0464 & 0.2278 & 0.1250 & 0.0031 & 0.0854 \\ 0.1816 & 0.5452 & 0.1678 & 0.1379 & 0.0031 & 0.0642 \\ 0.0738 & 0.0503 & 0.4543 & 0.1516 & 0.0032 & 0.0725 \\ 0.3170 & 0.5496 & 0.6562 & 0.1073 & 0.0192 & 0.2066 \\ 0.5097 & 0.5517 & 0.3389 & 0.6725 & 0.0529 & 0.8224 \\ 0.4769 & 0.1504 & 0.0671 & 0.2264 & 0.3616 & 0.2206 \\ 0.0349 & 0.0262 & 0.1485 & 0.0141 & 0.0009 & 0.2882 \\ 0.4186 & 0.0696 & 0.0500 & 0.5505 & 0.0011 & 0.2268 \\ 0.2868 & 0.0860 & 0.3206 & 0.0925 & 0.0017 & 0.1420 \\ 0.1368 & 0.1955 & 0.1490 & 0.1283 & 0.0011 & 0.0875 \\ 0.1462 & 0.0327 & 0.0026 & 0.1965 & 0.0014 & 0.1259 \\ 0.1576 & 0.0978 & 0.0360 & 0.1537 & 0.0014 & 0.0964 \\ 0.1259 & 0.0812 & 0.0803 & 0.1423 & 0.0011 & 0.1008 \\ 0.0971 & 0.0265 & 0.0803 & 0.1291 & 0.9306 & 0.1344 \end{bmatrix}_{14 \times 6} \quad (22)$$

### 4.2 综合权重计算与优化

本文在考虑多个静态电压稳定性指标进行客观分析时，同时考虑了专家经验判断以及数据修正等主观因素的影响，这样可以兼顾主客观因素，使分析结果更加准确。首先依据上一节计算结果，依据式(3)一式(5)运用熵权法计算客观权重，计算结果见图 4。

$$q_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0544 & 0.0711 & 0.0233 & 0.0982 & 0.0750 & 0.0751 \\ 0.1124 & 0.0690 & 0.1054 & 0.0448 & 0.0771 & 0.1117 \\ 0.1199 & 0.0690 & 0.0873 & 0.0715 & 0.0771 & 0.1112 \\ 0.1048 & 0.0691 & 0.0771 & 0.0855 & 0.0760 & 0.1036 \\ 0.0195 & 0.0835 & 0.0226 & 0.0774 & 0.0604 & 0.0066 \\ 0.0561 & 0.0698 & 0.1002 & 0.0396 & 0.0396 & 0.0804 \\ 0.0901 & 0.0754 & 0.0214 & 0.0818 & 0.0583 & 0.0121 \\ 0.0298 & 0.0718 & 0.0920 & 0.0996 & 0.0767 & 0.0569 \\ 0.0547 & 0.0705 & 0.0346 & 0.0984 & 0.0766 & 0.0777 \\ 0.1013 & 0.0691 & 0.0892 & 0.0736 & 0.0771 & 0.1017 \\ 0.0423 & 0.0710 & 0.1166 & 0.0109 & 0.0757 & 0.0498 \\ 0.0806 & 0.0692 & 0.1030 & 0.0470 & 0.0768 & 0.0892 \\ 0.0818 & 0.0693 & 0.0826 & 0.0769 & 0.0768 & 0.0842 \\ 0.0516 & 0.0715 & 0.0444 & 0.0940 & 0.0761 & 0.0391 \end{bmatrix}_{14 \times 6} \quad (23)$$

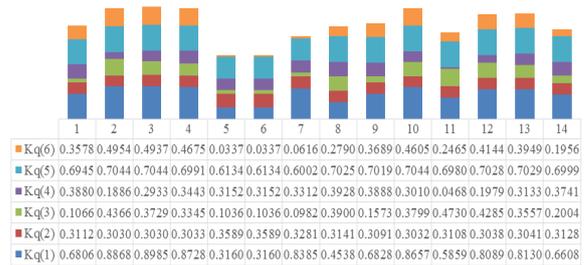
其次，根据专家经验对客观权重进行修正，进而可以得到各指标的主观权重，假设每个风电场的主观权重都相等，根据 1.1 节所建立的指标体系可以得到 A 层到 P 层的判断矩阵  $A_1$ ， $P_1$  层到  $X_i$  层的判断矩阵  $A_2$  以及  $P_2$  层到  $X_i$  层的判断矩阵  $A_3$ 。

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}; A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}.$$

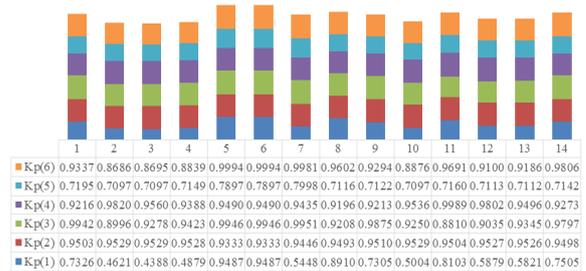
经过层次单排序、层次总排序，归一化以及一

致性检验后，得到权重向量分别为： $\omega(A_1)=[0.4930, 0.3111, 0.1969]$ ； $\omega(A_2)=[0.1189, 0.4406, 0.4406]$ ； $\omega(A_3)=[0.75, 0.25]$ 。主观权重最终计算结果为  $p_1 = p_2 = \dots = p_{14}=[0.0586, 0.2172, 0.2172, 0.2333, 0.0778, 0.1960]$ 。

最后，取  $\lambda = 0.5$ ，依照式(9)一式(14)采用 Lagrange 优化主客观权重的比重，所得结果见图 4。 $k_i^{(1)}$ ， $k_i^{(2)}$  的计算结果代入式(8)计算综合权重，得式(24)。



(a) 客观权重的比重  $k_i^{(1)}$



(b) 主观权重的比重  $k_i^{(2)}$

图 4 主、客观权重的比重

Fig. 4 Proportions of subjective and objective weights

$$\omega = \begin{bmatrix} 0.0800 & 0.2285 & 0.2184 & 0.2531 & 0.1081 & 0.2099 \\ 0.1268 & 0.2279 & 0.2414 & 0.2375 & 0.1095 & 0.2256 \\ 0.1335 & 0.2279 & 0.2341 & 0.2440 & 0.1096 & 0.2254 \\ 0.1201 & 0.2279 & 0.2305 & 0.2484 & 0.1087 & 0.2217 \\ 0.0618 & 0.2327 & 0.2184 & 0.2458 & 0.0985 & 0.1961 \\ 0.0733 & 0.2278 & 0.2264 & 0.2339 & 0.0857 & 0.1986 \\ 0.1076 & 0.2299 & 0.2183 & 0.2472 & 0.0972 & 0.1964 \\ 0.0658 & 0.2288 & 0.2359 & 0.2536 & 0.1093 & 0.2041 \\ 0.0802 & 0.2284 & 0.2199 & 0.2532 & 0.1092 & 0.2109 \\ 0.1171 & 0.2279 & 0.2348 & 0.2446 & 0.1095 & 0.2208 \\ 0.0723 & 0.2285 & 0.2465 & 0.2335 & 0.1086 & 0.2022 \\ 0.0997 & 0.2280 & 0.2404 & 0.2380 & 0.1093 & 0.2154 \\ 0.1007 & 0.2280 & 0.2324 & 0.2456 & 0.1093 & 0.2133 \\ 0.0781 & 0.2287 & 0.2217 & 0.2515 & 0.1089 & 0.1999 \end{bmatrix}_{14 \times 6} \quad (24)$$

### 4.3 Fuzzy-TOPSIS 综合评价法排序及分析

通过综合权重法得到各指标的综合权重后, 对 14 个风电场的静态电压稳定性指标进行模糊评价, 得到模糊矩阵。后由式(17)和式(18)可计算得到各指标基于静态稳定条件的贴近度: 即正理想解与负理想解; 其次, 根据式(19)和式(20)可计算得到各静态电压稳定性指标等级与正理想解和负理想解的距离, 最后, 由式(21)可得到最终排名结果, 见表 1。

表 1 TOPSIS 计算结果

Table 1 Calculation results of TOPSIS method

风电场	$Y^+$	$Y^-$	$D^+$	$D^-$	$C_i$
麻黄沟西	0.049 74	0.000 34	0.174 16	0.065 29	0.213 61
麻黄沟东	0.036 58	0.000 15	0.200 51	0.055 92	0.259 93
红星	0.125 73	0.000 35	0.212 87	0.054 59	0.342 55
望阳台西	0.151 24	0.002 09	0.206 99	0.056 23	0.272 66
望阳台	0.165 29	0.005 21	0.101 75	0.071 37	0.201 15
望阳台东	0.052 95	0.015 19	0.178 12	0.055 82	0.247 08
十三间房	0.136 08	0.003 75	0.142 91	0.074 46	0.412 24
广汇淖毛湖	0.046 29	0.000 12	0.177 29	0.058 18	0.238 61
淖毛湖	0.070 50	0.000 19	0.179 83	0.063 16	0.218 07
烟墩南	0.044 56	0.000 12	0.207 28	0.055 50	0.281 75
烟墩北	0.045 87	0.000 16	0.178 92	0.059 54	0.225 71
烟墩西	0.124 25	0.000 34	0.212 75	0.053 57	0.204 11
苦水西	0.034 96	0.000 12	0.198 08	0.057 74	0.259 92
苦水东	0.032 46	0.000 09	0.169 04	0.066 31	0.211 22

根据前文可知, 数值最大的节点为系统稳定节点, 所组成的区域为稳定区域。从表 1 中可以看出十三间房地区风电场母线综合评价价值最高, 为相对稳定节点。而望阳台与烟墩西地区的风电场的母线为薄弱节点, 该地区对系统扰动较为敏感, 当受到来自系统扰动时可能会引起节点电压崩溃, 严重的会引起整个系统崩溃, 因此这些地方需要重点监控以及进行无功补偿。

为了进一步说明多指标综合评价的优越性, 在表 2 中对比了不同种类的指标排序。在相同的运行条件下采用不同的静态电压稳定性指标来对同一母线进行分析时, 所获得的该母线的电压稳定、薄弱程度是不同的。比如  $K_p$  指标下麻黄沟东地区电压稳定性弱, 而  $S_Q$  指标则表明望阳台地区风电场电压稳定性弱, 二者结果存在一定差异性。这是由于不同的静态电压稳定性指标具有不同的机理, 反映的是不同的系统物理量及其相互之间的数学关系, 所得结果必然成存在差异性。因此, 在采用单一指标进行稳定电压母线或薄弱电压母线的识别与评估时, 缺乏系统的全面的判断, 难以为电力系统的运行决策提供可靠的依据, 这论证了结合多种电压稳定指

标进行综合评估的必要性。

表 2 不同种类指标排序

Table 2 Final rank of different kinds of indexes

No.	风电场	CE	$K_V$	$K_P$	$K_Q$	$S_p$	$S_Q$	L
1	麻黄沟西	7	6	7	11	8	7	3
2	麻黄沟东	3	5	14	12	9	13	7
3	红星	2	3	3	1	1	2	1
4	望阳台西	4	13	13	6	4	8	10
5	望阳台东	12	10	11	5	10	12	12
6	望阳台	13	11	8	13	13	14	13
7	十三间房	1	1	1	7	2	1	11
8	广汇淖毛湖	8	12	9	10	6	9	8
9	淖毛湖	11	2	12	2	3	10	9
10	烟墩南	9	9	6	3	12	3	4
11	烟墩北	6	4	10	9	11	4	6
12	烟墩西	14	14	2	14	14	5	14
13	苦水西	10	7	4	8	7	6	2
14	苦水东	5	8	5	4	5	11	5

采用综合静态电压稳定性指标分析电力系统电压稳定性基本包括了单一指标辨识出的稳定、薄弱程度比较靠前、后的母线。该方法充分考虑了各因素对电压稳定性的影响, 能够克服单一指标评判的片面性与差异性。综合评价模型的优越性主要在于专家可以通过改变评判指标, 增加或减少指标个数、改变指标类型, 套用不同的综合模型公式, 就可以得到不同目标的评价结果。同时, 由于引入了权重系数的概念, 专家可以根据电网的实际情况, 通过改变各指标的权重系数, 得到不同情况下的系统薄弱节点的判别结果。

## 5 总结

本文探讨了综合权重与 Fuzzy-TOPSIS 综合评价方法在电力系统静态电压稳定性分析中的应用。值得注意的是, 电力系统静态电压稳定性指标的选择除了本文所考虑的六种主要技术指标以外, 另有一些非技术因素指标, 如设备经济性与环境保护等问题, 在本文中并未考虑, 有待进一步完善。此外, 本文中所有的计算过程都已编成 C 语言程序, 该程序已投入工程实际应用。经实践证明该方法是可行的, 并具有准确实用、计算结果明确、易于推广等特点, 基本适应目前电网静态电压稳定性分析的评价水平和要求。

## 参考文献

- [1] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015-1022.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al.

- Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in Northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.
- [2] MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.
- [3] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [4] 李培强, 王继飞, 唐捷, 等. 基于模态分析的双馈机组对电压稳定性的影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 18-24.  
LI Peiqiang, WANG Jifei, TANG Jie, et al. Study on static voltage stability of system including DFIGs based on modal analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(4): 18-24.
- [5] 周名煜, 谢宁, 王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137.  
ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 130-137.
- [6] 傅旭, 王锡凡. 电力系统静态电压稳定性在线监控(一)一种可在线应用的计及负荷静态特性的电压稳定指标[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 23-26.  
FU Xu, WANG Xifan. On line voltage stability monitoring for electric power system part 1: on line voltage stability index considering load static characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 23-26.
- [7] LI Shenghu. Sensitivity model of L index for steady-state voltage stability of wind power systems with doubly fed induction generators[J]. Electric Power Components and Systems, 2016, 44(18): 2017-2024.
- [8] 卢锦玲, 石少通, 卢洋. 含大规模风电场的电网静态电压稳定性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 73-80.  
LU Jinling, SHI Shaotong, LU Yang. Static voltage stability assessment on the grid with large-scale wind farm connection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 7(6): 73-80.
- [9] 郭亚军. 综合评价理论方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 95-101.
- [10] 邹仁华, 王毅超, 邓元婧, 等. 基于变权综合理论和模糊综合评价的多结果输出输电线路运行状态评价方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1289-1295.  
ZOU Renhua, WANG Yichao, DENG Yuanjing, et al. Condition assessment method for transmission line with multiple outputs based on variable weight principle and fuzzy comprehensive evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1289-1295.
- [11] 梁纪峰, 胡雪凯, 胡文平, 等. 基于 PSASP 的高阻抗变压器工程应用价值模糊综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 134-139.  
LIANG Jifeng, HU Xuekai, HU Wenping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for engineering value of high impedance transformer based on PSASP[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 134-139.
- [12] 刘自发, 韦涛, 李梦渔, 等. 基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 60-66.  
LIU Zifa, WEI Tao, LI Mengyu, et al. Comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process for AC/DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 60-66.
- [13] 韩震焘, 黄志伟, 葛少云, 等. 城市配电网综合评价体系[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 95-99.  
HAN Zhentao, HUANG Zhiwei, GE Shaoyun, et al. A comprehensive evaluation system of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 95-99.
- [14] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.  
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [15] KENARI M, SEPASIAN M, NAZAR M. Probabilistic voltage stability assessment of distribution networks with wind generation using combined cumulants and maximum entropy method[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 95: 96-107.
- [16] 靳冰洁, 张步涵, 姚建国, 等. 基于信息熵的大型电力系统元件脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 61-68.  
JIN Bingjie, ZHANG Buhuan, YAO Jianguo, et al. Large-scale power system components vulnerability assessment based on entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39, 5: 61-68.
- [17] ZHAO Huiru, LI Nana. Performance evaluation for

- sustainability of strong smart grid by using stochastic AHP and fuzzy TOPSIS methods[J]. Sustainability, 2016, 8: 1-22.
- [18] 夏俊丽, 毛荀, 柯德平, 等. 基于综合评价的交、直流输电适用范围研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 120-126.
- XIA Junli, MAO Xun, KE Deping, et al. Applicable scope of AC and DC power transmission based on comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 120-126.
- [19] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网络规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-81.
- LUO Yi, LI Yulong. Comprehensive decision making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-81.
- [20] CAYIR E, DEMIREL Z, OMER F, et al. An ANP and fuzzy TOPSIS based SWOT analysis for Turkey's energy planning[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 1538-1550.
- [21] 简俊威, 吴杰康, 莫超, 等. 风电与电动汽车协同并网的电力系统动态环境经济多目标模糊优化调度模型[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 49-58.
- JIAN Junwei, WU Jiekang, MO Chao, et al. Multi-objective fuzzy optimization model of power system dynamic environmental and economic scheduling for cooperative grid-connection of wind power and electric vehicle[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 49-58.
- [22] 田靖雨, 王印松, 李士哲, 等. 基于协方差指标的火电机组协调控制系统性能模糊评价方法[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 47-51.
- TIAN Jingyu, WANG Yinsong, LI Shizhe, et al. Fuzzy assessment of performance of coordinated control system in thermal power unit based on covariance index[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 47-51.
- [23] 张忠会, 曾如霞, 赖飞屹. 基于模糊层次分析法的农村配电网低电压治理[J]. 广东电力, 2017, 30(9): 111-117.
- ZHANG Zhonghui, ZENG Ruxia, LAI Feiyi. Low voltage governance for rural power distribution network based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(9): 111-117.

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-01-28

作者简介:

武家辉(1988—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与分析; E-mail: wjha29@sina.com

王维庆(1959—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为可再生能源并网、电力系统稳定与分析; E-mail: wwq59@sina.com

王海云(1973—), 女, 教授, 研究方向为可再生能源并网。E-mail: 327028229@qq.com

(编辑 周金梅)