

# 风电场宏观选址综合决策方法的研究

陶奕衫<sup>1</sup> 闫广新<sup>1</sup> 王建军<sup>2</sup> 马乐<sup>2</sup> 张同宇<sup>2</sup>

(1. 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

**摘要:** 针对目前风电场选址方案评估决策中指标体系不全面以及主观确定方案等问题, 提出了基于层次分析法和灰色关联分析法相结合主客观综合地选择出合适的风电场场址。首先综合考虑了风能、联网、地质、交通与施工等确定了风电场宏观选址现场各指标, 再采用改进的层次分析法确定各指标权重, 最后利用灰色关联度分析法结合各指标权重, 达到了从主客观角度综合分析确定风电场宏观选址。并选取新疆 3 个风区选址方案进行了分析, 验证了该方法的可行性, 从而为风电场科学投资提供了理论依据。

**关键词:** 层次分析法; 灰色关联度; 主客观; 宏观选址

**Abstract:** Aiming at the incomplete indexes system and subjective scheme of wind farm macro-siting, the method based on the combination of analytic hierarchy process (AHP) and grey correlation is proposed to select the appropriate wind-farm macro-siting objectively and subjectively. Firstly, the wind sources, the grid integration, the geology, transportation and construction are comprehensively considered to determine the various indicators of the wind farm macro-siting, and then the improved AHP is adopted to determine the each index weight. At last, the grey correlation combined with the weight is utilized to determine the wind farm macro-siting. The comprehensive decision of three schemes for selecting wind farms in Xinjiang is analyzed and the reasonable analysis results are attained. The research results might provide a scientific basis for investment decision.

**Key words:** analytic hierarchy process (AHP); grey correlation; objective and subjective; macro-siting

中图分类号: TK621 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0027-04

## 0 引言

风电场宏观选址是风电建设项目的首要任务, 亦决定了整个风电场投资的经济效益; 对风电场进行前期考察综合判断现场各指标对风电场影响成为了研究的焦点, 为判断选址方案的优劣提供了参考。文献[1-3]评价了风电场宏观选址的风能资源; 文献[4]采用 ArcGIS 分析 SRTM (shuttle radar topography mission) 提取选址区域起伏度、坡度两个地形参数; 文献[5]利用地理信息系统 (geographic information system, GIS) 技术评价了风电场交通条件, 现实条件下风电场宏观选址应考虑风能、联网、交通运输和施工、地质和地貌条件以及其他因素<sup>[6-7]</sup>; 文献[8]列举了选址影响因素, 并未采用任何方法对选址方案进行评估决策; 文献[9, 10]采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 对风电场宏观选址评估分析, 但选址决策结果依赖于专家意见, 没有能

够充分利用客观数据。

针对上述问题, 首先利用层次分析法<sup>[9, 10]</sup>将风电场选址现场所要考虑各因素划分成有序的递阶层次结构, 再采用三标度法构造判断矩阵提高收敛速度、一致性以及归一化专家构建判断矩阵的权重向量的期望作为各指标权重, 最后利用灰色关联度分析法在“小样本、贫信息”下确定各方案与理想方案的关联程度<sup>[11, 12]</sup>, 从主、客观角度综合分析决策, 选择出合适风电场场址, 为风电场宏观选址提供了理论依据。

## 1 综合决策方法

### 1.1 改进的层次分析法

层次分析法是美国运筹学家 T. L. Saaty 在 20 世纪 70 年代中期提出的一种系统化、层次化分析的方法。但不能很好处理不确定因素, 不同专家对构造的判断矩阵有不同的认可, 判断矩阵经常出现不

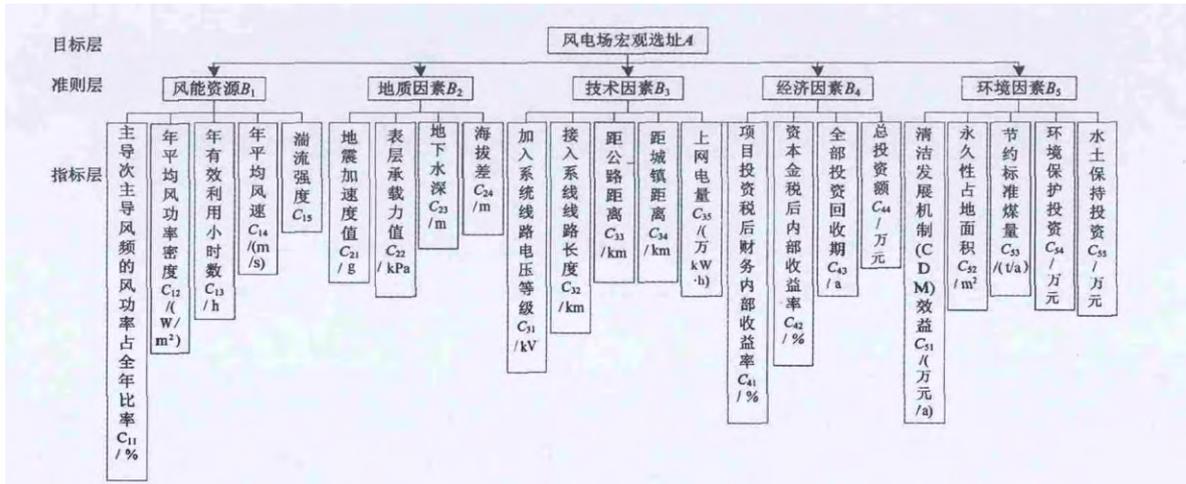


图 1 递阶层次结构

注:  $B_1$  各项数据于测风塔 70 m 处采集; 年有效利用小时数  $C_{13}$  为风速介于 3 ~ 25 m/s 的时间; 湍流强度  $C_{12}$  为 10 min 内风速随机变化幅度大小; 上网电量  $C_{35}$  根据当地实际状况由 WAsP 计算得出; 清洁发展机制(CDM) 效益为在国际碳交易市场中相对于火电厂 风电场发相同电量减排的  $CO_2$  以 80 元/t 价格出售获取的效益; 节约标准煤量  $C_{53}$  以每度电耗标准煤 350 g 计风电场每年按所发电量可节约标准煤量, 也间接体现减排  $CO_2$ 、 $SO_2$  等污染物的量; 环境保护投资  $C_{54}$  包含风电场水环境保护、生活污水与垃圾处理、大气环保、环境监测、环境监理等费用; 水土保持投资  $C_{55}$  包含工程措施、植物措施以及临时措施投资等费用。

一致性的情况<sup>[13]</sup>等不足之处, 采用有别于传统层次分析法 1 ~ 9 标度的三标度法构造判断矩阵来提高收敛速度和一致性; 归一化各专家判断矩阵形成权重向量的期望, 作为各指标的权重。

采用改进 AHP 包含以下步骤。

(1) 确定风电场宏观选址递阶层次结构

综合考虑利用谷歌地球(Google Earth, GE) 统计分析选址现场交通、并网、施工技术条件等, 以及考虑风能、地质、经济以及对环境影响等因素, 确定了图 1 所示风电场选址的递阶层次结构。

(2) 求解准则层某子准则权重过程

①建立比较矩阵 A

专家采用三标度法两两比较指标的相对重要性得出如下比较矩阵 A。

$$A = (a_{ij}) = \begin{bmatrix} & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ a_1 & & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_2 & a_{21} & & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_n & a_{n1} & a_{n2} & \cdots & & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中  $a_1 \sim a_n$  为各个指标;

$$a_{ij} = \begin{cases} 2 & a_i \text{ 比 } a_j \text{ 重要} \\ 1 & a_i \text{ 与 } a_j \text{ 同等重要,} \\ 0 & a_j \text{ 比 } a_i \text{ 重要} \end{cases}$$

为指标  $a_i$  与指标  $a_j$  之间的比较结果。

②构造判断矩阵 C

$$C = \begin{bmatrix} & a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ a_1 & & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_2 & a_{21} & & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_n & a_{n1} & a_{n2} & \cdots & & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式(2)中 } r_{ij} = \begin{cases} \left[ \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}} (k_m - 1) + 1 \right]^{-1} & r_i \geq r_j \\ \frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}} (k_m - 1) + 1 & r_i < r_j \end{cases}$$

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad k_m = r_{\max} / r_{\min} \quad r_{\max} = \max\{r_1, r_2, \dots, r_n\} \quad r_{\min} = \min\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$$

③求解权重向量及检验一致性

采用特征向量法求判断矩阵 C 的最大特征值  $\lambda_{\max}$  及对应特征向量 W 为权重向量。然后将  $\lambda_{\max}$  引入相容性指标  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$  检验判断矩阵的一致性。当  $CI < 0.1$  认为判断矩阵一致性符合要求;  $CI \geq 0.1$  判断矩阵一致性不符合要求, 修改比较矩阵, 重新计算并一致性检验, 直到满足要求<sup>[14]</sup>。

④确定各指标权重

归一化 m 个专家判断矩阵形成的权重向量  $\bar{W} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W^{(k)}$  得各指标权重, 即

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{w}_i} \quad (3)$$

式中,  $W^{(k)} = (w_1^k \ w_2^k \ \dots \ w_n^k)$   $k=1, 2, \dots, m$ ;  $m$  为参与专家人数;  $W^{(k)}$  为第  $k$  个判断矩阵形成的权重向量;  $\bar{W}$  为权重向量的期望;  $w_i$  为第  $i$  个指标权重。

### 1.2 灰色关联度分析法

灰色关联分析法基于邓聚龙教授提出的灰色系统理论<sup>[15]</sup>, 利用几何原理比较分析理想方案各指标与实际方案各指标间的关联度, 判断各方案与理想方案偏差程度, 关联度越大表明越接近理想方案。同时结合 AHP 法确定对风电场的宏观选址起直接影响关联度和评估决策结果的权重, 从而对风电场宏观选址完全从客观角度进行决策。

具体步骤如下。

#### (1) 均值化处理

采用公式(4) 均值化处理由评估方案数  $m$  与指标层指标  $n$  ( $C_{11} \sim C_{55}$ ) 构成数组  $x(m \times n)$ 。

$$x'_i(j) = \frac{x_i(j)}{\bar{x}_i} \quad \bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i(j) \quad (4)$$

式中  $x_i(j)$  为在第  $i$  种方案下第  $j$  个指标值;  $\bar{x}_i$  为期望值;  $x'_i(j)$  为均值化的值。

#### (2) 求各指标关联系数

$$\xi_i(j) = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta_i(j) + \rho\Delta(\max)} \quad (5)$$

式中  $\xi_i(j)$  为第  $j$  个指标关联系数;  $\Delta_j(j) = |x'_0(j) - x'_i(j)|$   $x'_0(j)$  为理想方案中第  $j$  个指标值;  $\Delta(\max) = \max_i \max_j \Delta_i(j)$ ;  $\Delta(\min) = \min_i \min_j \Delta_i(j)$ ;  $\rho$  为分辨系数, 取值区间为  $[0, 1]$ , 参考文献<sup>[16]</sup> 去除主观因素优化得到  $\rho = 0.69$ 。

#### (3) 确定各方案灰色关联度

由 AHP 确定各指标权重以及公式(5) 得各指标关联系数, 综合决策得出各评价方案的灰色关联度。

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j \xi_i(j) \quad (6)$$

式中  $\gamma_i$  为第  $i$  种评价方案与理想方案的关联度。

具体综合决策流程, 如图 2。

## 2 算例分析

选取具有优良风能资源的新疆 9 大风区中额尔齐斯河河谷、十三间房、哈密三塘湖—淖毛湖等风区, 对装机容量均为 49.5 MW 风电场宏观选址进行综合

决策。以上 3 种方案简称为方案 1、方案 2、方案 3。

通过搜集测风塔资料、现场调研、利用 GE 遥感影像等多种渠道确定风电场选址现场客观指标值, 如表 1。

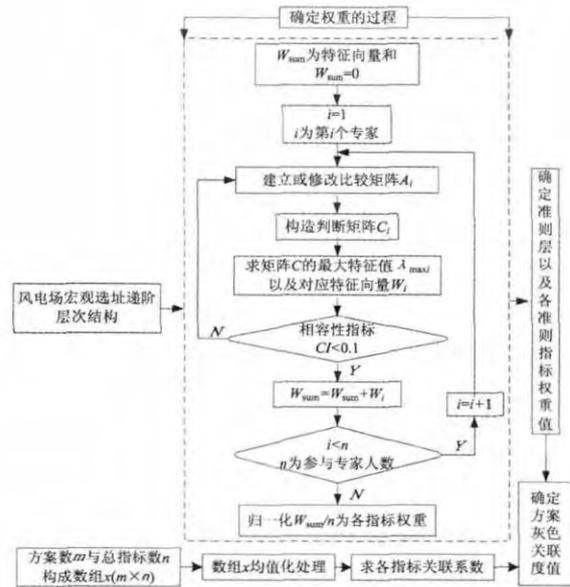


图 2 综合决策流程图

表 1 3 种方案指标数据

准则层	指标	方案 1	方案 2	方案 3
风能资源 $B_1$	$C_{11}$	57.65	97.3	82.2
	$C_{12}$	416.15	772.18	525.06
	$C_{13}$	5 689	6 343	6 936
	$C_{14}$	6.19	9.58	6.49
	$C_{15}$	0.112	0.095	0.102
地质因素 $B_2$	$C_{21}$	0.05	0.10	0.10
	$C_{22}$	130	270	280
	$C_{23}$	3.5	12	15
	$C_{24}$	50	80	90
	$C_{31}$	110	110	110
技术因素 $B_3$	$C_{32}$	25	7.5	15
	$C_{33}$	0.2	5	2
	$C_{34}$	25	55	17
	$C_{35}$	11 484.0	10 584.5	9 438.1
	$C_{41}$	7.12	7.38	7.18
经济因素 $B_4$	$C_{42}$	8.94	10.58	9.56
	$C_{43}$	11.17	11.94	11.11
	$C_{44}$	48 379.04	42 350.97	42 739.99
	$C_{51}$	741.6	684.4	456.9
	$C_{52}$	8.50	18.55	6.66
环境因素 $B_5$	$C_{53}$	3.93	3.70	3.32
	$C_{54}$	204	30	52
	$C_{55}$	90.6	80.1	207.9

### 2.1 确定指标权重

本项目共有 3 位专家参与, 根据公式(1) ~ (3) 确定各指标权值,  $\alpha = (0.032, 0.032, 0.039, 0.037,$

0.053 , 0.046 , 0.043 , 0.039 , 0.039 , 0.071 , 0.053 ,  
0.031 , 0.035 , 0.044 , 0.033 , 0.031 , 0.038 , 0.063 ,  
0.045 , 0.036 , 0.043 , 0.060 , 0.057) 。

### 2.2 灰色关联度分析

根据公式(4) ~ (5) 确定各指标关联系数矩阵

0.408	0.408	0.408	0.408	0.408	1.000
1.000	1.000	0.592	1.000	1.000	0.408
0.644	0.499	1.000	0.431	0.626	0.408
0.408	0.408	1.000	1.000	0.408	1.000
0.912	0.726	0.479	0.408	1.000	0.408
1.000	1.000	0.408	1.000	0.617	0.648
0.766	1.000	0.408	0.408	0.905	0.408
0.408	0.611	1.000	1.000	0.408	1.000
1.000	0.408	0.473	0.526	1.000	0.914
1.000	0.817	1.000	0.408	0.894	
0.774	0.408	0.647	1.000	1.000	
0.408	1.000	0.408	0.845	0.408	

结合改进 AHP 确定权重  $\alpha$  以及公式(6) 可得 3 种选址方案与理想方案的灰色关联度  $\gamma = [0.671 , 0.755 , 0.691 ]$ 。结果表明 , 方案 1 与理想方案的关联度最小 , 方案 2 比方案 3 关联度较为冗余 , 因此基于风能资源、地质因素、技术因素、经济因素以及环境因素的风电场宏观选址综合决策 , 方案 2 为最优方案。

## 3 结 论

综合考虑风电场风能资源、地址条件、联网、施工以及交通等多方面因素 , 确定了风电场现场宏观选址指标体系 , 采用改进 AHP 与灰色关联度分析法相结合从主客观角度综合决策风电场宏观选址。并对新疆 3 大风区拟建 49.5 MW 风电场宏观选址进行算例分析 , 最终得出了科学、合理的结论。

当然 , 实际风电场宏观选址要考虑更多方面的因素 , 综合决策考虑所有因素不现实、也不科学 , 因此如何从众多因素中挑选出主导因素成为下一个研究的内容。

### 参考文献

[1] Lee A H I ,Chen H H ,Kang H Y. Multi - criteria Deci-

sion Making on Strategic Selection of Wind Farms [J]. Renewable Energy 2009 ,34( 1) : 120 - 126.

[2] 邓院昌 余志. 基于参考风电机组的风电场宏观选址资源评价方法[J]. 太阳能学报 2010 ,31( 11) : 1516 - 1520.

[3] 谢建明 邱毓昌. 大型风力发电场选址与风力发电机优化匹配[J]. 太阳能学报 2001 ,22( 4) : 465 - 42.

[4] 邓院昌 余志 钟权伟. 风电场宏观选址中地形条件的分析与评价[J]. 华东电力 2010 ,38( 8) : 1244 - 1247.

[5] 邓院昌 余志 周卉. 风电场宏观选址中交通条件的一种评价方法[J]. 华东电力 2010 ,38( 2) : 281 - 284.

[6] 中华人民共和国发展与改革委员会[2003] 1430 号. 风电场场址选择技术规定[Z]. 北京: 2003.

[7] 宫靖远. 风电场工程技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社 2004.

[8] 风电场选址与风机优化排布实用技术探讨[J]. 电力科学与工程 2010 ,26( 3) : 1 - 4.

[9] 云丽萍. 风电场选址优化的模糊综合评价研究[D]. 北京: 华北电力大学 2008.

[10] 邓院昌 宁洪涛 王铁强. 基于 GIS 的风电场宏观选址综合评价方法及应用[C]. 中国可持续发展论坛暨中国可持续发展学术年会 2007.

[11] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2002.

[12] 刘思峰 党耀国 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社 2004.

[13] 赵云飞 陈金雷. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备 2004 ,24( 9) : 85 - 87.

[14] 李晓辉 张来 李小宇 等. 基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制 2008 ,36( 14) : 57 - 61.

[15] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2002: 35 - 76.

[16] 吕锋. 灰色系统关联度之分辨率系数的研究[J]. 系统工程理论与实践 ,1997 ,17( 6) : 49 - 54.

### 作者简介:

陶奕衫(1971), 工程师, 从事电力系统规划设计工作;  
 闫广新(1981), 工程师, 从事电力系统规划设计工作;  
 王建军(1986), 工程师, 从事高压试验工作;  
 马 乐(1987), 工程师, 从事高压试验工作;  
 张同宇(1987), 工程师, 从事电力营销工作。

(收稿日期: 2013 - 11 - 06)