

文章编号:0254-0096(2020)08-0095-07

基于灰色关联度和证据理论的电源规划 综合评价指标体系研究

钟嘉庆¹, 王璐¹, 赵楠²

(1. 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 燕山大学, 秦皇岛 066004; 2. 国网天津市电力公司宁河供电分公司, 天津 301500)

摘要: 为对电源规划方案进行全面、有效的评价, 提出一种基于灰色关联理论和证据理论电源规划综合评价指标体系建立方法。首先建立电源规划综合评价指标体系, 对规划方案的可靠性、安全性、经济性和环保性4个方面进行综合评价; 采用灰色关联理论与证据理论相结合的方法实现客观的灰色关联理论与专家主观经验的结合, 保证评价指标体系的正确性与合理性。其次建立基于云模型的指标权重集、和隶属度矩阵, 进行云模型综合评价。在此基础上, 通过算例仿真验证电源规划综合评价指标体系与云模型综合评价模型的相结合的方法, 为电源规划方案综合决策提供一套较系统、完整的评价方法。

关键词: 电源规划; 灰色关联度; 证据理论; 评价指标体系; 云模型

中图分类号: TM715

文献标志码: A

0 引言

电源发展与规划通常涉及经济、资源、环境以及科技等诸多因素, 各因素间往往会相互联系^[1]。近年, 国内外学者通过建立评价指标体系对规划方案进行综合评价已广泛应用于微电网和配电网领域, 具体研究包括建立基于不同分布式电源/微电网并网方式和不同商业模式的项目综合效益评价模型, 以及储能^[2-3]支撑高比例分布式光伏接入的价值评估方法。目前指标多集中于电源规划方案的一个方面或几个方面, 缺乏对规划方案全面和系统的分析。文献[4]提出一种新的微电网规划评价指标体系构建方法。该体系将不同参与主体的利益进行区分, 并包含评价微电网性能的指标, 但是并没有安全性, 缺乏全面系统的分析。文献[5]考虑分布式电源可靠性与系统停电损失的关系, 并根据分布式电源接入后系统可靠性的提高程度计算系统减少停电损失的社会效益。并给出工业大用户的停电损失函数, 解决配电网经济性分析的另外一个难点, 但未考虑安全性与环保性。因此本文建立综合考虑安全性、可靠性、经济性以及环保性等多方面影响因素的电源规划综

合评价指标体系。

文献[6]提出基于 DEMATEL-ANP-反熵权法和改进灰色关联度法的组合权重分层优选模型, 计算求解指标体系的指标权重值, 使其兼顾主观性和客观性, 但未用到灰色关联理论与证据理论相结合不能清楚地表示指标简单关联度以及是否需要筛选。文献[7]考虑到国内以煤炭为主的能源结构, 分析不同碳排放总量管制目标、不同可再生能源发展场景及不同煤炭供应约束对电源规划的影响, 但没有对不同目标及场景的关联度进行分析。

本文采用灰色关联理论与证据理论相结合的方法, 实现客观的灰色关联理论与专家主观经验的结合, 保证评价指标体系的正确性和合理性。同时, 考虑到综合评价过程中等级边界及隶属度确定过程中的模糊性, 采用云模型综合评价模型对电源规划方案进行评价。

1 初始电源规划综合评价指标体系

在建立评价指标体系时, 一方面要尽可能全面地反映电源规划评价中的各种影响因素; 另一方面, 尽量避免指标之间出现重复交叉的情况。通过对电源特性及

收稿日期: 2018-01-23

基金项目: 河北省高等学校学科技术研究重点项目(ZD2020129); 国家自然科学基金(6187023566)

通信作者: 王璐(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统经济运行与控制、电力系统规划、低碳电力等方面的研究。
1875674366@qq.com

评价指标的研究,本文从可靠性、安全性、经济性、环保性 4 个方面建立电源规划综合评价指标体系,其中包含 4 个一级指标及 17 个二级指标,如表 1 所示。

表 1 专家建立的综合评估指标体系

Tabl 1 Index system of comprehensive evaluation established by experts

一级指标	二级指标
可靠性 X_1	电力不足期望值 X_{11}
	电力不足频率 X_{12}
	电力不足持续时间 X_{13}
	电量不足期望值 X_{14}
安全性 X_2	电源负荷匹配度 X_{21}
	间歇性能源所占比例 X_{22}
	水电机组比例 X_{23}
	外区电量比例 X_{24}
经济性 X_3	投资成本 X_{31}
	运行成本 X_{32}
	厂用电率 X_{33}
	碳排放费用 X_{34}
环保性 X_4	清洁能源所占比例 X_{41}
	二氧化碳排放量 X_{42}
	氮氧化物排放量 X_{43}
	二氧化硫排放量 X_{44}
	粉煤灰排放量 X_{45}

1.1 可靠性指标

本文选取电力不足期望值、电力不足频率、电力不足持续时间、电量不足期望值 4 个指标,这类指标是通过研究对象过去某段时间的实际运行数据进行收集和统计计算得出的结论,属于客观概率计算。

1.2 安全性指标

本文安全性指标在传统指标基础上,考虑风电等间歇性能源所占比例、水电机组比例、外区电量送出和受入等因素对系统供电情况的影响,较全面地评估规划方案中的潜在风险。

1) 电源负荷匹配度 X_{21} :指本地电源最大可用容量与本地最大发电负荷之比,该指标反映本区供电电量的宽裕程度:

$$X_{21} = \frac{C_{e1}}{L_{e1}} \quad (1)$$

式中, C_{e1} ——本地电源最大可用容量, MW; L_{e1} ——本

地最大发电负荷, MW。

本地电源负荷匹配度越大,表明该地区供电量越宽裕,安全性越高。

2) 间歇性能源所占比例 X_{22} :指间歇性能源装机容量占系统总装机容量的百分比。间歇性能源建设必须与火电等其他常规电源按照一定比例配套发展:

$$X_{22} = \frac{C_{e2}}{C_e} \times 100\% \quad (2)$$

式中, C_{e2} ——间歇性能源装机容量, MW; C_e ——系统总装机容量, MW。

间歇性能源所占比例越大,会出现系统等效峰谷差增大,调峰需求增大的情况,对系统安全稳定运行影响越大。

3) 水电机组比例 X_{23} :指系统水电机组装机容量占总装机容量的百分比:

$$X_{23} = \frac{C_{e3}}{C_e} \times 100\% \quad (3)$$

式中, C_{e3} ——系统水电机组装机容量, MW; C_e ——系统总装机容量, MW。

水电机组尤其是抽水蓄能电站具有良好的调峰、调频性能,可平抑和延缓间歇性电源并网对电力系统的不利影响。

4) 外区电量比例 X_{24} :指外区电量占本地发电量的百分比。该指标反映本地区供电依靠本地电源的程度:

$$X_{24} = \frac{Q_0}{Q} \times 100\% \quad (4)$$

式中, Q_0 ——外区电量值, MWh; Q ——本地发电量, MWh。

若外区电量为受入电量,该指标为正,且数值越大,系统风险越高。

1.3 经济性指标

1) 投资成本 X_{31} :投资成本根据电厂的单位装机容量投资与装机容量计算得到:

$$X_{31} = \sum_{h=1}^l Q_h \cdot \alpha_h \quad (5)$$

式中, Q_h ——火电、水电、风电、太阳能发电机组装机容量, MW; α_h ——为每类电站单位装机容量投资成本, 万元/MW。

2) 运行成本 X_{32} :包括固定运行维护成本和可变运行成本:

$$X_{32} = C_{ma} + \sum_{h=1}^n W_h \cdot \beta_h \cdot \omega_h \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

式中, C_{ma} ——固定运行维护成本,根据经验大致估算, $C_{ma} = \lambda X_{31}$, 本文固定运行维护成本系数 λ 取 1.5%,

W_h ——火电机组年发电量,亿 kWh; β_h ——单位电量能耗率, g/kWh; ω_h ——燃料价格,元/t; n ——机组总数; h ——机组数。

3) 厂用电率 X_{33} : 是指发电过程中全厂范围内各主、辅系统所用的总电量占同一时期机组发电量的百分比:

$$X_{33} = \frac{Q_f - Q_s}{Q_f} \times 100\% \quad (7)$$

式中, Q_f ——全厂发电量,亿 kWh; Q_s ——全厂上网电量,亿 kWh。

4) 碳排放费用 X_{34} : 不同的电源规划方案^[8]将形成不同的 CO₂ 排放轨迹与分布,从而在整体上产生一定的 CO₂ 交易额度,超过或少于排放限额的部分均通过 CDM 交易进行衡量。碳排放费用为单位交易价格与交易量的乘积:

$$X_{34} = k \times (M_{1t} - M_{2t}) \quad (8)$$

$$M_{2t} = K_1 \times K_2 \times K_3 \quad (9)$$

式中, k ——单位交易价格,万元/t; M_{1t} 、 M_{2t} ——时间 t 内系统的 CO₂ 实际排放总量和分配的排放额度,万 t; K_1 ——时间 t 内我国行业总的 CO₂ 排放额度,万 t; K_2 ——电力工业 CO₂ 排放比重系数; K_3 ——待规划区域或省份的电力系统 CO₂ 排放比重系数。

1.4 环保性指标

1) 清洁能源所占比例 X_{41} : 指清洁能源装机容量占系统总装机容量的百分比:

$$X_{41} = \frac{C_{e3}}{C_e} \times 100\% \quad (10)$$

式中, C_{e3} ——清洁能源装机容量, MW, 包括水电、风电、光伏发电等; C_e ——系统总装机容量, MW。

2) CO₂ 放量 X_{42} : 指单位时间(如一年)产生 CO₂ 总量。采用发电量乘以单位电量 CO₂ 排放值计算得出。

3) NO_x 排放量 X_{43} : 指单位时间产生 NO_x 总量, 本文采用发电量乘以单位电量 NO_x 排放值得出。

4) SO₂ 排放量 X_{44} : 指单位时间产生 SO₂ 总量, 采用发电量乘以单位电量 SO₂ 排放值得出。

5) 粉煤灰排放量 X_{45} : 指单位时间产生粉煤灰总量, 本文采用发电量乘以单位电量粉煤灰排放值计算得出。

2 建立基于灰色关联理论和证据理论的电源规划综合评价指标体系

本文应用灰色关联理论计算指标间的灰色绝对关联度, 筛选出具有强关联性的指标, 应用证据理论对多

位专家的意见进行融合, 综合考虑多位专家的意见, 使结果更具客观性。指标体系建立流程如图 1 所示, 图中 ε_{ij} 代表可信度, 下标 i 、 j 为指标、等级; r_1 、 r_2 分别代表一级指标灰色绝对关联度阈值、二级指标灰色绝对关联度阈值。

本文由专家给出指标需要筛选的信任度分配表, 计算指标需要筛选的可信度和不可信度。指标的处理原则是: 所有证据体(4 位专家)的可信度融合结果中, 当可信度大于不可信度时, 表明该事件是可信的, 即需要对指标进行筛选; 当不可信度大于可信度时, 表明该事件不可信, 即不需要对指标进行筛选, 需要对阈值 r_2 进行调整。然后选取每类二级指标中具有代表性的指标作为中心指标, 计算一级指标的灰色绝对关联度, 处理原则同二级指标。

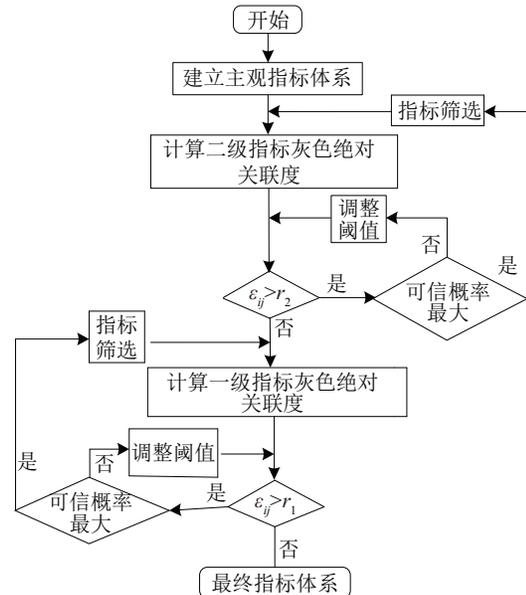


图 1 基于灰色关联理论和证据理论的指标建立流程

Fig. 1 Establishment process of index system based on gray correlation theory and evidence theory

3 云模型综合评价模型

网络层次分析法(analytic network process, ANP)中考虑元素间的相互影响与支配, 更能准确地描述现实世界中客观事物之间的联系。

设指标 i 对应的等级 j 的上、下边界值为 $x_{j_{\min}}^i$ 、 $x_{j_{\max}}^i$, 则指标 i 对应的等级 j 这一定性概念可用云模型表示, 其中云模型为:

$$Ex_j^i = (x_{j_{\min}}^i + x_{j_{\max}}^i) / 2 \quad (11)$$

等级间的界限值具有模糊性, 会有同时属于 2 个等级的情况, 如 $x_{j_{\max}}^i$ 既属于 j 等级, 又应属于第 $(j+1)$ 等级。

根据正态云的“ $3En$ 规则”,带有模糊性的云模型:

$$En_j^i = (x_{j_{\min}}^i + x_{j_{\max}}^i) / 2.355 \quad (12)$$

设指标 i 的属性值 a 对应等级 j (期望 Ex 、熵 En 和超熵 He) 的隶属度为 u_{ij} 。根据正向云发生器原理,利用各等级给定熵 En 和超熵 He 生成正态分布的随机数 $En' = NORM(En, He^2)$,按式计算隶属度:

$$u_{ij} = \exp\left[-\frac{(a - Ex)^2}{2(En')^2}\right] \quad (13)$$

在建立综合评价指标体系的基础上,确定各级指标的权重集 W 、评价矩阵 R ,最终综合评价结果采用模糊合成算法:

$$S = W \cdot R \quad (14)$$

根据最大隶属度原则,隶属度最大值所对应等级为方案的最终评价结果。

4 算例分析

根据表 1 所列的电源规划综合评价指标体系,利用中国 4 个省份(江苏、河南、山东、山西)某年的实际数据^[9]对各指标进行计算,求得指标值如表 2 所示。在

表 2 算例中各二级指标计算值

Table 2 Results of secondary indicators

评估指标	江苏	河南	山东	山西
电力不足期望值 $X_{11}/h \cdot a^{-1}$	4.19	14.20	3.16	8.67
电力不足频率 $X_{12}/\text{次}$	16801	17588	704	8019
电力不足持续时间 X_{13}/h	2.45	3.92	2.45	4.14
电量不足期望值 X_{14}/MWh	87.68	82.47	1.95	49.27
电源负荷匹配度 X_{21}	1.26	1.46	1.62	1.81
间歇性能源所占比例 $X_{22}/\%$	1.87	0.11	1.43	0.29
水电机组比例 $X_{23}/\%$	2.01	7.8	1.74	3.94
外区电量比例 $X_{24}/\%$	11.08	3.64	2.52	-34.23
投资成本 X_{31}	2331.0	1807.1	2401.3	1590.3
运行成本 $X_{32}/\text{亿元}$	628.40	405.65	577.1	373.1
厂用电率 $X_{33}/\%$	5.44	6.40	7.43	8.02
碳排放费用 $X_{34}/\text{亿元}$	201.44	104.66	186.24	130.94
清洁能源所占比例 $X_{41}/\%$	7.42	7.91	3.17	4.23
二氧化碳排放量 $X_{42}/\text{万 t}$	28165	19790	28494	18444
氮氧化物排放量 $X_{43}/\text{万 t}$	177.98	125.06	180.05	116.55
二氧化硫排放量 $X_{44}/\text{万 t}$	90.40	63.52	91.46	59.20
粉煤灰排放量 $X_{45}/\text{万 t}$	146.90	103.22	148.62	96.20

本文仿真中,初步选定一级指标灰色绝对关联度阈值^[10] r_1 为 0.55,二级指标灰色绝对关联度阈值 r_2 为 0.70。

4.1 基于灰色关联度和证据理论综合评价指标体系建立

4.1.1 二级指标分析

分别计算可靠性指标、安全性指标的灰色绝对关联度,结果如表 3 所示。由表 3 可得指标间灰色绝对关联度均大于 0.50,表明指标之间存在关联性,上述指标可归为一大类,同时指标间关联度均小于阈值 0.70,表明指标符合要求,不存在强关联性指标。经济性指标的灰色绝对关联度,如表 4 所示。

表 3 可靠性指标/安全性指标灰色绝对关联度

Table 3 Gray relevancy of indicators of reliability

指标	X_{11}/X_{21}	X_{12}/X_{22}	X_{13}/X_{23}	X_{14}/X_{24}
X_{11}/X_{21}	1.00	0.50/0.56	0.62/0.59	0.50/0.51
X_{12}/X_{22}	0.50/0.56	1.00	0.50/0.52	0.50/0.54
X_{13}/X_{23}	0.62/0.59	0.50/0.52	1.00	0.50/0.51
X_{14}/X_{24}	0.50/0.51	0.50/0.54	0.50/0.51	1.00

表 4 经济性指标灰色绝对关联度

Table 4 Gray relevancy of indicators of economy

指标	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}
X_{31}	1.00	0.74	0.50	0.59
X_{32}	0.74	1.00	0.50	0.68
X_{33}	0.50	0.50	1.00	0.50
X_{34}	0.59	0.68	0.50	1.00

经济性指标间灰色绝对关联度均大于 0.50,表明指标之间存在关联性,上述指标可归为一大类。同时,投资成本 X_{31} 与运行成本 X_{32} 灰色绝对关联度 0.74 大于阈值 0.70,表明指标之间关联性较强,需要运用证据理论决定是否对指标进行筛选。

本文由 4 位专家给出 2 个指标(投资成本 X_{31} 、运行成本 X_{32})需要筛选的(可信度,不可信度)分配值为:

$$(m_1, m_2, m_3, m_4) = \left[\begin{array}{l} (0.8, 0.2), (0.5, 0.5), \\ (0.4, 0.6), (0.3, 0.7) \end{array} \right] \quad (15)$$

式中, $m_1 \sim m_4$ ——第 1~4 位的可信度。

对指标需要筛选的专家可信度进行融合,结果为:

$$(m_{1-2}, m_{1-3}, m_{1-4}) = \left[(0.691, 0.309), (0.562, 0.438), (0.397, 0.603) \right] \quad (16)$$

式中, m_{1-2} 、 m_{1-3} 、 m_{1-4} ——前 2 位、前 3 位和前 4 位专家可信度的融合值。

4位专家的可信度融合结果:可信度 0.397 小于不可信度 0.603,说明专家认为该事件不可信,即 2 个指标(投资成本 X_{31} 、运行成本 X_{32})不需要筛选。在不同的方案中,由于各类电源装机容量不同会使运行成本产生较大差异,为体现方案的经济性,不对上述 2 指标进行筛选。因此,需要对阈值进行调整,选定二级指标灰色绝对关联度阈值为 0.74,指标满足要求。同时,验证可靠性指标及安全性指标间灰色绝对关联度均满足要求。环保性指标的灰色绝对关联度,结果如表 5 所示。

表 5 环保性指标灰色绝对关联度

Table 5 Gray relevancy of indicators of environmental protection

指标	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{45}
X_{41}	1.00	0.50	0.54	0.56	0.53
X_{42}	0.50	1.00	0.51	0.51	0.51
X_{43}	0.54	0.51	1.00	0.76	0.91
X_{44}	0.56	0.51	0.76	1.00	0.81
X_{45}	0.53	0.51	0.91	0.81	1.00

由表 5 可得,环保性指标间关联度均大于 0.5,表明指标之间存在关联性,上述指标可以归为一大类。氮氧化物排放量 X_{43} 、二氧化硫排放量 X_{44} 、粉煤灰排放量 X_{45} 间的绝对关联度均大于阈值 0.74,表明指标间存在强关联性,需要运用证据融合理论决定是否对指标进行筛选,方法同经济性指标。环保性指标需要筛选的可信度证据融合结果为:

$$(m_{1-2}, m_{1-3}, m_{1-4}) = [(0.716, 0.284), (0.515, 0.485), (0.660, 0.340)] \quad (17)$$

4位专家的可信度融合结果:可信度 0.660 大于不可信度 0.340,说明专家认为该事件是可信的,即 3 个指标 X_{43} 、 X_{44} 和 X_{45} 需要筛选。由于 3 个指标都可以表示燃煤机组对环境的污染程度,将 3 个指标合并,既消除冗余,又能反映发电机组污染物排放量的多少,不使信息严重受损。由于 X_{45} 指标与 X_{41} 和 X_{42} 指标的关联度分别为 0.54 和 0.51,较其他指标与 X_{41} 和 X_{42} 灰色绝对关联度较小,故本文保留 X_{45} 指标。最终,确定二级指标灰色关联度阈值为 0.74,可靠性指标、安全性指标、经济性指标及环保性指标间灰色绝对关联度均满足要求。

4.1.2 一级指标分析

选取每个二级指标类中具有代表性的指标作为中

心指标,计算一级指标的灰色绝对关联度。本文选定的中心指标及指标间的灰色绝对关联度计算结果如表 6 所示。由表 6 可得,一级指标间关联度均小于 0.55,表明指标之间不存在强关联性,指标符合要求,验证了专家指标分类的合理性。

表 6 一级指标灰色绝对关联度

Table 6 Gray relevancy of primary indicators

指标	X_{11}	X_{21}	X_{31}	X_{41}
X_{11}	1.00	0.55	0.50	0.50
X_{21}	0.55	1.00	0.50	0.50
X_{31}	0.50	0.50	1.00	0.55
X_{45}	0.50	0.50	0.55	1.00

至此,利用灰色关联理论和证据理论建立一套较为全面、系统的电源规划综合评价指标体系,如表 7 所示。

表 7 电源规划综合评价指标体系

Table 7 Comprehensive evaluation index system of generation planning

一级指标	二级指标
可靠性 X_1	电力不足期望值 X_{11}
	电力不足频率 X_{12}
	电力不足持续时间 X_{13}
安全性 X_2	电量不足期望值 X_{14}
	电源负荷匹配度 X_{21}
	间歇性能源所占比例 X_{22}
	水电机组比例 X_{23}
经济性 X_3	外区电量比例 X_{24}
	投资成本 X_{31}
	运行成本 X_{32}
	厂用电率 X_{33}
环保性 X_4	碳排放费用 X_{34}
	清洁能源所占比例 X_{41}
	二氧化碳排放量 X_{42}
	粉煤灰排放量 X_{45}

4.2 云模型综合评价

本文采用上述指标体系及云模型综合评价方法,以山西省为例对电源规划方案进行综合评价。采用 Super Decisions 软件进行实例计算,得 ANP 方法得各二级指标权重:

$$W_0 = \begin{pmatrix} w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}; \\ w_{21}, w_{22}, w_{23}, w_{24}; \\ w_{31}, w_{32}, w_{33}, w_{34}; \\ w_{41}, w_{42}, w_{45} \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$= \begin{pmatrix} 0.25, 0.25, 0.25, 0.25; \\ 0.39, 0.17, 0.17, 0.27; \\ 0.29, 0.41, 0.12, 0.18; \\ 0.25, 0.54, 0.21 \end{pmatrix}$$

各一级权重指标:

$$W_0 = (w_1, w_2, w_3, w_4) \quad (19)$$

$$= (0.423, 0.227, 0.227, 0.123)$$

在准则集云模型计算中,由于某些指标的等级标准不明确,本文获取全国多省市的指标值,采用准则集边界值获取方法,建立准则集云模型。最终,以全国多省市平均水平为标准,得到电源规划综合评价结果如表 8 所示。

表 8 云模型的综合评价结果

Table 8 Comprehensive evaluation results of cloud mode

项目	优秀	良好	较好	一般	较差
可靠性	0.171	0.439	0.140	0.000	0.250
安全性	0.371	0.069	0.206	0.216	0.138
经济性	0.000	0.000	0.413	0.467	0.120
环保性	0.000	0.000	0.309	0.492	0.199
综合结果	0.157	0.201	0.238	0.216	0.189

为体现方案的合理性采用模糊层次分析法^[11]加以对比,如表 9 所示。将各方案等级隶属度期望值和隶属度归一化处理,对应分数给定为:(优秀,良好,较好,一般,较差)=(95,85,75,65,55)。由表可知,山西省电力外送容量大,装机富裕较多,系统发电量相对负荷需求较充足,可靠性指标良好。

表 9 模糊层次分析法的综合评价结果

Table 9 Comprehensive evaluation results of fuzzy analytic hierarchy process

项目	优秀	良好	较好	一般	较差
可靠性	0.121	0.245	0.020	0.000	0.030
安全性	0.275	0.057	0.136	0.154	0.079
经济性	0.000	0.000	0.326	0.335	0.028
环保性	0.000	0.000	0.105	0.370	0.085
综合结果	0.000	0.169	0.113	0.174	0.102

计算表 8 中综合评分为 75.774,表 9 中的综合评分为 75.463。综上所述,2 种综合评价方法所得结论相同,验证了云模型多属性决策方法的有效性。

另由于山西省风力发电起步较晚,间歇性能源装机

容量比重较低,对电力系统调峰、调频性能影响较小,加之系统装机容量较充裕,安全性指标属优秀。山西省电源装机容量较大,使山西省在经济性和环保性两方面得分一般。综合考虑上述指标,全国范围内,山西省电源规划方案较好。未来山西省规划风电装机容量迅速增加,致使调峰需求不断增大,势必会对可靠性、安全性指标产生影响,山西省应优化电源结构,优先考虑具有优良调节性能的大型燃煤发电机组,加快抽水蓄能电站的建设。

5 结 论

本文提出一种基于灰色关联度和证据理论相结合的指标体系建立方法,综合考虑规划方案的可靠性、安全性、经济性和环保性,建立电源规划综合评价指标体系,并利用云模型对电源规划方案进行综合评价。

[参考文献]

- [1] 袁兆祥,孔祥玉,崔凯. 可持续发展电源规划多目标决策模型研究[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 25-30.
YUAN Z X, KONG X Y, CUI K. Multi-objective decision making model research for generation expansion planning with sustainable development[J]. Electric power construction, 2015, 36(5): 25-30.
- [2] GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D. A review of power distribution planning in the modern power systems era: models, methods and future research[J]. Electric power systems research, 2015, 121(3): 89-100.
- [3] 黄碧斌,李琼慧. 储能支撑大规模分布式光伏接入的价值评估[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 88-93.
HUANG B B, LI Q H. Evaluation of energy storage support for large scale distributed photovoltaic access [J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(6): 88-93.
- [4] 卢志刚,周雷,杨丽君,等. 微电网规划评价指标体系研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(9): 25-29.
LU Z G, ZHOU L, YANG L J, et al. Index system of microgrid planning evaluation [J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 2014, 33(9): 25-29.
- [5] 李蕊. 基于不同商业运营模式的分布式电源/微电网综合效益评价方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1748-1758.
LI R. Comprehensive benefit evaluation method of

- distributed generation/microgrid projects based on different business models[J]. Power system technology, 2017, 41(6): 1748-1758.
- [6] 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 X J, GE S Y, LIU H, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid [J]. Power system technology, 2014, 38(1): 40-46.
- [7] 罗金山, 路畅, 孟繁骏. 碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 47-52.
LUO J S, LU C, MENG F J. Generation expansion planning and its benefit evaluation considering carbon emission and coal supply constraints [J]. Automation of electric power system, 2016, 40(11): 47-52.
- [8] 苏海锋, 胡梦锦, 梁志瑞, 等. 基于时序特性含储能装置的分布式电源规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 56-63.
SU H F, HU M J, LIANG Z R, et al. Distributed generation & energy storage planning based on timing characteristics [J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(6): 56-63.
- [9] China Electricity Council. China electric power industry statistics analysis 2011[R]. Beijing:, 2011: 178-210.
- [10] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与TOPSIS法的光伏发电项目风险评价研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1514-1519.
LI Y B, YU X Y, WANG Z J. Risk assessment on photovoltaic power generation project by grey correlation analysis and TOPSIS method [J]. Power system technology, 2013, 37(6): 1514-1519.
- [11] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 75-81.
ZHANG J J, XU X L, DING M, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Power system protection and control, 2017, 45(3): 75-81.

COMPREHENSIVE EVALUATION INDEX SYSTEM OF GENERATION PLANNING BASED ON GRAY CORRELATION DEGREE AND EVIDENCE THEORY

Zhong Jiaqing¹, Wang Lu¹, Zhao Nan²

(1. Key Laboratory of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province(Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China; 2. Ninghe Power Supply Company, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 301500, China)

Abstract: In order to make a comprehensive and effective evaluation of power supply planning, this paper proposes a method for establishing a comprehensive evaluation index system of power supply planning based on grey correlation theory and evidence theory. The index system is divided into four aspects: reliability, security, economy and environmental factors. Using the method combined grey theory with evidence theory, it is realized the combination of the objective gray theory with subjective experience of experts so that its correctness and reasonable are guaranteed. And then, a comprehensive evaluation of cloud model is established based on index weight set, norms set and degree of membership matrix. This method is validated by a simulation example, which combined a comprehensive evaluation index system of generation planning with a comprehensive evaluation of cloud mode. This program provides a complete set of evaluation programs for generation planning comprehensive decision-making.

Keywords: power planning; grey correlation; evidence theory; evaluation index system; cloud model