

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231246

考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系

李响¹, 武海潮², 王文雪², 安全²

(1. 郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450015; 2. 河南聚研电力科技有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了解决传统电网评价体系在评价大规模新能源和电网相互作用复杂机理时存在的不足, 建立一套考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标评价体系。首先, 从新型电力系统的核心特征出发, 贯穿“源网荷储”各个环节, 构建包含接入水平、协调水平、适应水平以及承载水平4个维度的电网性能评价指标, 显性表达各个指标的统计或计算方式。其次, 采用AHP-CRITIC法进行主客观组合赋权, 依据电网发展数据自身的客观属性, 考虑数据离散程度以及皮尔逊相关系数, 挖掘指标间的冲突性和变异性, 以增强权重设置的科学性。最后, 利用某城市新能源和电网数据对指标体系进行测算, 通过对比分析说明所提指标体系与评价方法的有效性, 并依据指标灵敏度大小对电网薄弱环节提出发展建议。

关键词: 新能源; 新型电力系统; 指标体系; 皮尔逊相关系数; 权重

Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy

LI Xiang¹, WU Haichao², WANG Wenxue², AN Quan²

(1. Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China;
2. Henan Juyan Electric Power Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: There are deficiencies in evaluating the complex mechanism of the mutual effects between large-scale new energy and the power grid by traditional power grid evaluation systems. Thus a performance evaluation index system is established considering large-scale new energy access. First, based on the key characteristics of the new power system and considering all parts of “power supply, grid, load and energy storage”, a power grid performance evaluation index containing connection, coordination, adaptation and carrying capacity levels can be set up. In addition, it explicitly expresses the statistical or calculation method for each index. Secondly, the AHP-CRITIC method is used to enable subjective and objective weights, and investigate the conflict and changeability among different indices based on the objective property of data from the power grid and computing standard deviation/Pearson correlation coefficient to highlight the scientific features on setting index weights. Finally, the index system for the data from new energy and the power grid in one city is surveyed and computed. The effectiveness of the proposed index system and evaluation method is shown through comparison and analysis. Some development proposals for weak parts of the power grid are proposed on the basis of the indicator’s sensitivity.

This work is supported by the Science and Technology Project of Henan Province (No. 222102240117).

Key words: new energy; new power system; index system; Pearson correlation coefficient; weight

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是我国电力发展的方向和目标^[1-3], “双碳”目标的不断落实, 更加突出其重要性和紧迫性^[4-5]。近年来, 随着一系列利好政策的落实, 以风电、光伏为代表的新

能源发展迅速^[6]。在大规模新能源接入电网时, 一方面能够为电网提供绿色、环保的电能^[7], 另一方面新能源的随机性、间歇性、波动性给电网的规划建设、运行调度带来了一定的影响^[8-9]。

为了使新能源能够与电网协调发展、互相适应, 研究人员对新能源和电网开展了大量的研究工作。文献[10]充分考虑分布式电源接入配电网后的环保效应, 建立了包含设备运行状态、供电可靠性、

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(222102240117)

电能质量、经济性以及环保性能指标的配电网指标评估体系,适用于含高比例新能源接入的配电网评估。文献[11]针对高占比可再生能源的不确定性对电网带来的安全风险,从调度侧或新能源侧提出灵活性指标,对系统的灵活性进行评价。文献[12]以大规模风电为研究对象,从空间分布-电力潮流-指标类别3个维度,建立风电消纳全过程评价指标体系,为新能源消纳、规划打下基础。文献[13]从电源侧和电网侧提出适应水电站的评价指标体系,采用层次分析-熵权法对梯级水电接入电网的适应性进行评价。文献[14]从经济、安全、环境、技术4个方面选取11个指标,采用层次分析-熵权法对煤电和清洁能源的演化路径进行评价。文献[15]针对园区多能系统,将其能效分析分解为供能子系统和能源转换设备,建立评价体系对园区多能源系统综合能效进行评价。

在能源与电网融合大趋势下,针对大规模新能源与电网间相互作用的复杂机理^[16-17],本文基于新型电力系统的核心特征以及新能源接入对电网的要求,建立一套考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系。该指标体系以促进新能源规模化发展为目标,贯穿源、网、荷、储各个环节,真实、

全面地反映电网性能;显性表达各个指标的统计或计算方式,以量化大规模新能源接入时对电网接入水平、协调水平、适应水平及承载水平;采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和标准间冲突性相关性法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC),得到指标综合权重,从而实现大规模新能源并网时的多维度、多层次电网消纳能力综合评价。本文以某城市电网为研究对象,通过该城市新能源和电网数据对提出的指标体系进行测算,验证该指标体系的可行性和实用性。

1 评价指标体系的目标与准则

大规模新能源接入电网,在为电网提供绿色、环保能源的同时^[18],也对电网安全、电压质量、短路电流等方面带来了一定的影响^[19-20]。因此,需要建立综合评价指标体系来评价新能源接入电网的适配程度,大规模新能源接入电网评价指标体系如图1所示,该指标体系以提高大规模新能源和电网之间的适配性为目的,从新型电力系统的核心特征及新能源接入对电网的要求出发,综合电网侧、电源侧、负荷侧、储能侧的要求,从接入水平、协调水平、适应水平和承载水平4个维度考量。

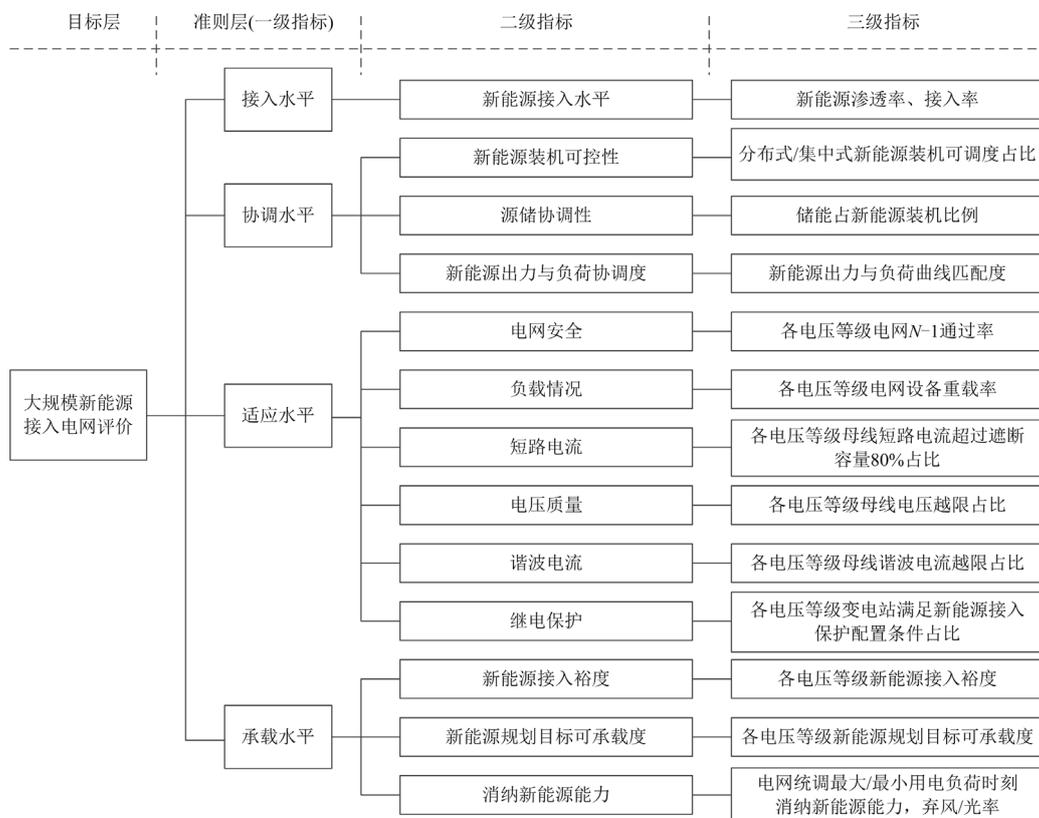


图1 考虑大规模新能源接入电网的性能评价指标体系

Fig. 1 Performance evaluation index system of power grid considering the large-scale new energy integration

接入水平用来表征电网接入新能源的总体水平,其主要衡量并网新能源电站发电量、装机容量与用电量、总装机容量之间的比例关系,反映电网已接入新能源的基本情况。

协调水平用来表征新能源装机可控能力,以及与储能、负荷间的协调性。由于新能源存在一定的反调峰作用(发电高峰与用电高峰趋势相反),新能源装机接入后,电网调度的灵活性可能会降低,发电、用电负荷的协调性可能会变差,将对电网调度安全带来较大影响。协调水平主要从源网荷储的协调性角度分析新能源接入对电网调度和安全的影响。

适应水平用来表征电网接入新能源的适应能力,即电网的坚强程度。新能源接入可能会导致设备 $N-1$ 不通过、重载设备增加、电压波动增大、谐波电流增加等方面的问题,从而对电网的安全稳定、供电能力、电压质量产生较大影响。电网越坚强,新能源接入后对这些方面的影响越小。

承载水平用来表征新能源消纳现状和接入裕度。新能源发电应尽可能以本地消纳为主,条件允许情况下才可通过主网外送,可通过典型负荷时刻新能源出力占比反映电网消纳能力。

2 评价指标

2.1 接入水平指标

接入水平指标主要反映电网新能源接入水平。三级指标包括新能源渗透率和接入率两个参数。

新能源渗透率 A_{11} 指新能源总发电量 ΣE_{NG} 占总发电量 ΣE_G 的比例,公式表示为

$$A_{11} = \frac{\Sigma E_{NG}}{\Sigma E_G} \times 100\% \quad (1)$$

新能源接入率 A_{12} 是指新能源装机总容量 ΣP_{NG} 占总装机容量 ΣP_G 的比例,如式(2)所示。

$$A_{12} = \frac{\Sigma P_{NG}}{\Sigma P_G} \times 100\% \quad (2)$$

2.2 协调水平指标

协调水平指标主要反映系统电源和负荷的协调性。二级指标有新能源装机可控性、源储协调性、新能源出力与负荷协调度。三级指标包括分布式/集中式新能源装机可调度占比、储能占新能源装机比例、新能源出力与负荷曲线匹配度。

1) 新能源装机可控性

集中式新能源装机可调度占比 B_{11} 是指可调度的集中式新能源装机容量 ΣP_{CCNG} 占新能源装机总容量的比例,如式(3)所示。

$$B_{11} = \frac{\Sigma P_{CCNG}}{\Sigma P_{NG}} \times 100\% \quad (3)$$

分布式新能源装机可调度占比 B_{12} 是指可调度的分布式新能源装机容量 ΣP_{CDNG} 占新能源装机总容量的比例,如式(4)所示。

$$B_{12} = \frac{\Sigma P_{CDNG}}{\Sigma P_{NG}} \times 100\% \quad (4)$$

2) 源储协调性

储能占新能源装机比例 B_{21} 是指储能装置装机容量 ΣP_{SPU} 占新能源装机总容量的比例,如式(5)所示。

$$B_{21} = \frac{\Sigma P_{SPU}}{\Sigma P_{NG}} \times 100\% \quad (5)$$

3) 新能源出力与负荷协调度

新能源出力与负荷协调度是指新能源出力曲线与负荷变化曲线的一致性,将出力曲线和负荷曲线标么化后,进行匹配度计算,以此判断新能源出力与负荷之间的协调程度。有功功率标么值 P_* 的计算公式为

$$P_* = \frac{P_i}{P_{\max}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, P_i 、 P_{\max} 分别为有功功率的实际值和最大值。

以新能源出力与年负荷曲线匹配度 B_{31} 为例,计算公式为

$$B_{31} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n (P_{G,i} - \overline{P_G})(P_{L,i} - \overline{P_L}) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{G,i} - \overline{P_G})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{L,i} - \overline{P_L})^2}} \quad (7)$$

式中: $P_{G,i}$ 、 $\overline{P_G}$ 分别为新能源年出力曲线的标么值及平均值; $P_{L,i}$ 、 $\overline{P_L}$ 分别为年负荷曲线最大值的标么值及平均值。

计算新能源出力与典型日负荷曲线匹配度 B_{32} ,需要采用典型日的新能源出力数据和负荷数据。

2.3 适应水平指标

适应水平指标主要反映电网对大规模新能源接入的适应能力、坚强程度。二级指标有电网安全、负载情况、短路电流、电压质量、谐波电流和继电保护。三级指标包括各电压等级电网 $N-1$ 通过率、电网设备重载率、母线短路电流超过遮断容量 80% 占比、母线电压越限占比、母线谐波电流越限占比、变电站满足新能源接入保护配置条件占比。

某一电压等级电网的 $N-1$ 通过率是指该电压等级电网通过 $N-1$ 的设备数量占电网设备总量的比例。以 220 kV 电网的 $N-1$ 通过率 C_{11} 为例,如式(8)所示。

$$C_{11} = \frac{N_{P220N-1}}{N_{220}} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $N_{P220N-1}$ 、 N_{220} 分别为通过 $N-1$ 的 220 kV 设备数量及 220 kV 设备总量, 电力设备一般指变压器和线路。

1) 重载情况

某一电压等级重载设备占比是指该电压等级电网中重载设备数量占设备总量比例。以 220 kV 重载设备占比 C_{21} 为例, 如式(9)所示。

$$C_{21} = \frac{N_{220OQ}}{N_{220}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, N_{220OQ} 为 220 kV 重载设备数量。

2) 短路电流

某一电压等级的短路电流超过遮断容量 80% 占比指该电压等级电网中短路电流超过断路器遮断容量 80% 的母线占比。以 220 kV 短路电流超过遮断容量 80% 占比 C_{31} 为例, 如式(10)所示。

$$C_{31} = \frac{N_{220BSO}}{N_{220B}} \times 100\% \quad (10)$$

式中, N_{220BSO} 、 N_{220B} 分别为 220 kV 短路电流超过遮断容量 80% 的母线数量、母线总量。

3) 电压质量

某一电压等级的母线电压越限占比是指该电压等级电网中母线电压越限占比。以 220 kV 母线电压越限占比 C_{41} 为例, 如式(11)所示。

$$C_{41} = \frac{N_{220BVO}}{N_{220B}} \times 100\% \quad (11)$$

式中, N_{220BVO} 为 220 kV 母线电压越限数量。

4) 谐波电流

某一电压等级的母线谐波电流越限占比是指该电压等级电网中母线谐波电流越限占比。以 220 kV 母线谐波电流越限占比 C_{51} 为例, 如式(12)所示。

$$C_{51} = \frac{N_{220BHCO}}{N_{220B}} \times 100\% \quad (12)$$

式中, $N_{220BHCO}$ 为 220 kV 母线谐波电流越限数量。

5) 继电保护

某一电压等级线路满足新能源接入保护配置条件占比是指该电压等级满足新能源接入保护配置条件线路占线路总条数的比例。以 220 kV 线路满足新能源接入保护配置条件占比 C_{61} 为例, 如式(13)所示。

$$C_{61} = \frac{N_{220MRPL}}{N_{220L}} \times 100\% \quad (13)$$

式中, $N_{220MRPL}$ 、 N_{220L} 分别为 220 kV 满足新能源接入保护配置条件线路条数、220 kV 线路总条数。

2.4 承载水平评价指标

承载水平指标主要反映电网接入新能源剩余容量、新能源规划目标可承载度以及电网消纳新能源的能力, 二级指标有新能源接入裕度、新能源规划目标可承载度、消纳新能源能力。三级指标包括各电压等级新能源接入裕度、各电压等级新能源规划目标可承载度、电网统调最大/最小用电负荷时刻消纳新能源裕度、弃风/光率。

1) 新能源接入裕度

某一电压等级的新能源接入裕度是指该电压等级新能源装机剩余容量占最大允许新能源接入容量的比例。以 220 kV 及以下新能源接入裕度 D_{11} 为例, 如式(14)所示。

$$D_{11} = \left(1 - \frac{\Sigma P_{220NGM}}{\Sigma P_{220NGD}} \right) \times 100\% \quad (14)$$

式中, ΣP_{220NGD} 、 ΣP_{220NGM} 分别为 220 kV 已接入的新能源装机容量、可接入的新能源最大装机容量。

2) 新能源规划目标可承载度

某一电压等级的新能源规划目标可承载度是指已规划新能源装机容量占最大允许新能源接入容量比例。以 220 kV 新能源规划目标可承载度 D_{21} 为例, 如式(15)所示。

$$D_{21} = \frac{\Sigma P_{220NGM}}{\Sigma P_{220NPGD}} \times 100\% \quad (15)$$

式中, ΣP_{220NGM} 、 $\Sigma P_{220NPGD}$ 分别为 220 kV 新能源装机规划容量、新能源装机规划最大允许容量。

3) 消纳新能源能力

电网统调最大用电负荷时刻消纳新能源裕度 D_{31} 反映在最大用电负荷时刻负荷消纳新能源的能力。

$$D_{31} = \left(1 - \frac{\Sigma P_{NGD,MAX}}{\Sigma P_{L,MAX}} \right) \times 100\% \quad (16)$$

式中, $\Sigma P_{NGD,MAX}$ 、 $\Sigma P_{L,MAX}$ 分别为统调最大用电负荷时刻新能源出力及负荷之和。

电网统调最小用电负荷时刻消纳新能源裕度 D_{32} 反映在最小用电负荷时刻负荷消纳新能源的能力。

$$D_{32} = \left(1 - \frac{\Sigma P_{NGD,MIN}}{\Sigma P_{L,MIN}} \right) \times 100\% \quad (17)$$

式中, $\Sigma P_{NGD,MIN}$ 、 $\Sigma P_{L,MIN}$ 分别为统调最小用电负荷时刻新能源出力、负荷之和。

弃风/光率指由于电网接纳能力不足、风/光电场建设工期不匹配和风/光电不稳定等导致的风机/

光伏停止发电的现象。以弃风率 D_{33} 为例, 如式(18)所示。

$$D_{33} = \frac{\Sigma P_{AWP}}{\Sigma P_{AWPG} + \Sigma P_{AWP}} \times 100\% \quad (18)$$

式中, ΣP_{AWP} 、 ΣP_{AWPG} 分别为弃风电量、风电实际发电量。

3 基于 AHP-CRITIC 法组合赋权

主观赋权常采用 AHP 法, 该方法能够结合专家经验对指标重要性进行判断, 首先建立初始判断矩阵, 求取判断矩阵的最大特征值, 然后进行一致性判断, 得到主观权重向量 α 。

为克服主观赋权的随意性, 采用 CRITIC 法进行客观赋权, 通过计算指标的标准差和相关系数充分挖掘大规模新能源并网时电网性能指标的差异性和冲突性。假设有 m 个方案, 每个方案有 n 个指标, 则评价矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

为消除量纲对评价结果的影响, 对各个指标进行无量纲处理, 形成无量纲的标准矩阵 X'' , 使所有数据能用统一的标准去衡量。

对于正向指标, 标准化后的对应元素如式(20)所示。

$$x_{ij}^1 = \frac{x_{ij} - \min(x_j^1)}{\max(x_j^1) - \min(x_j^1)} \quad (20)$$

式中: x_j^1 表示正向指标列向量; x_{ij}^1 表示正向指标列向量 x_j^1 中的各元素; x_{ij}^1 表示标准化后的正向指标。

对于逆向指标标准化后的对应元素如式(21)所示。

$$x_{ij}^2 = \frac{\max(x_j^2) - x_{ij}^2}{\max(x_j^2) - \min(x_j^2)} \quad (21)$$

式中: x_j^2 表示逆向指标列向量; x_{ij}^2 表示逆向指标列向量 x_j^2 中的各元素; x_{ij}^2 表示标准化后的逆向指标。

第 i 个指标的变异性 σ_i 如式(22)所示。

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ij}'' - \bar{x}_i'')^2} \quad (22)$$

式中: x_{ij}'' 表示标准矩阵 X'' 第 i 行、第 j 列元素; \bar{x}_i'' 表示第 i 个指标的均值。

指标的冲突性 ρ_{ij} 为如式(23)所示。

$$\rho_{ij} = \text{cov}(X_i'', X_j'') / (\sigma_i \sigma_j) \quad (23)$$

式中, $\text{cov}(X_i'', X_j'')$ 表示标准矩阵 X'' 第 i 行和第 j 行的协方差。

根据 CRITIC 方法计算每个指标所包含的信息 G_i , 如式(24)所示。

$$G_i = \sigma_i \sum_{j=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad (24)$$

客观权重 β_i 计算公式如式(25)所示。

$$\beta_i = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^n G_j} \quad (25)$$

由主观权重向量 α 和客观权重向量 β 可得到综合权重向量 H , 如式(26)所示。

$$H = k\alpha + (1 - k)\beta \quad (26)$$

式中, k 为偏好系数, 取值区间为[0,1], 一般取 0.5。

4 应用实例

4.1 自然资源和电网基本情况

以中部某城市为例, 该城市太阳能资源丰富, 年日照时间达 1200~2400 h, 是太阳能资源一类地区, 适宜开发光伏发电; 境内 600 m 以上高山 17 座, 平均风速高于 5.5 m/s。同时, 具有可利用荒山荒坡 2.34 万亩、屋顶 22 万 m^2 。

截至 2022 年底, 该城市新能源累计投资 74 亿元, 装机达 117.46 万 kW, 其中, 风电装机 63.6 万 kW, 光伏装机 52.6 万 kW, 年发电能力近 15 亿 kWh。该城市电网有 220 kV 变电站 2 座, 4 台主变总容量为 54 万 kVA; 110 kV 变电站 6 座, 9 台主变总容量为 38.45 万 kVA; 110 kV 架空线路 16 条, 总长度为 218.34 km; 35 kV 变电站 11 座, 19 台主变总容量为 13.53 万 kVA; 35 kV 架空线路 23 条, 总长度为 309.41 km; 10 kV 变压器 2783 台, 总容量为 46.98 万 kVA; 10 kV 架空线路 112 条, 总长度为 2158.36 km。

4.2 指标体系与评价方法

本文所建立的三级指标体系及不同权重设定方法对比如表 1 所示, 一级、二级指标及相关计算结果如表 2 所示, 与传统指标体系与评价方法相比, 有以下特征。

1) 在指标体系方面, 传统的评估体系一般侧重于新能源接入时对电网消纳能力、安全风险、电能质量等某一方面的评价^[21-22]。以风光为代表的大规模新能源并网, 改变了传统电力系统的结构和运行方式, 传统的指标体系不再适用。本文所建立的电网性能指标体系以电网安全稳定运行和大规模新

能源消纳为前提, 以合理调配资源、优化协同控制为目标, 从接入水平、协调水平、适应水平和承载水平 4 个维度分层级、分电压等级评估“源网荷储”

适配性, 是传统评价指标体系所无法得出的, 因此, 本文所建立的评价指标体系更加全面、合理。

表 1 三级指标的相关计算数据

Table 1 Related calculation data of the third-level indicators

三级指标	指标值	指标评分	主观权重 (AHP 法)	客观权重		指标得分	
				CRITIC 法	熵权法	AHP-CRITIC 法	AHP-熵权法
新能源渗透率 A_{11}	21.82	81.81	0.057	0.019	0.019	3.10	3.11
新能源接入率 A_{12}	42.53	52.41	0.057	0.019	0.020	1.98	2.00
集中式新能源装机可调度占比 B_{11}	61.50	80.75	0.066	0.020	0.024	3.47	3.63
分布式新能源装机可调度占比 B_{12}	15.21	100	0.028	0.019	0.020	2.36	2.40
储能占新能源装机比例 B_{21}	10.49	61.96	0.050	0.019	0.019	2.13	2.14
新能源出力与年负荷曲线匹配度 B_{31}	50.34	60.45	0.015	0.019	0.020	1.02	1.04
新能源出力与典型日负荷曲线匹配度 B_{32}	73.21	90.95	0.015	0.020	0.024	1.59	1.76
220 kV 电网 $N-1$ 通过率 C_{11}	92.94	71.76	0.014	0.027	0.019	1.48	1.19
110 kV 电网 $N-1$ 通过率 C_{12}	86.09	92.17	0.008	0.024	0.042	1.44	2.29
35 kV 电网 $N-1$ 通过率 C_{13}	71.32	82.65	0.005	0.019	0.019	0.98	0.99
10 kV 线路 $N-1$ 通过率 C_{14}	64.92	79.89	0.004	0.019	0.019	0.90	0.92
220 kV 重载设备占比(变压器+线路) C_{21}	19.05	80.95	0.018	0.019	0.019	1.47	1.49
110 kV 重载设备占比(变压器+线路) C_{22}	12.17	71.3	0.010	0.028	0.018	1.34	0.97
35 kV 重载设备占比(变压器+线路) C_{23}	14.71	61.18	0.006	0.027	0.021	1.03	0.84
10 kV 重载设备占比(变压器+线路) C_{24}	5.14	84.31	0.004	0.027	0.019	1.33	1.00
220 kV 母线短路电流超过遮断容量 80%占比 C_{31}	1.23	75.4	0.030	0.027	0.019	2.14	1.85
110 kV 母线短路电流超过遮断容量 80%占比 C_{32}	0.00	100	0.016	0.029	0.018	2.26	1.68
35 kV 母线短路电流超过遮断容量 80%占比 C_{33}	0.00	100	0.011	0.029	0.018	1.99	1.41
10 kV 母线短路电流超过遮断容量 80%占比 C_{34}	1.78	64.4	0.008	0.028	0.025	1.16	1.04
220 kV 母线电压越限占比 C_{41}	2.18	70.93	0.022	0.030	0.018	1.83	1.41
110 kV 母线电压越限占比 C_{42}	1.21	83.87	0.012	0.030	0.018	1.74	1.24
35 kV 母线电压越限占比 C_{43}	1.43	80.93	0.008	0.023	0.048	1.27	2.24
10 kV 母线电压越限占比 C_{44}	2.88	61.6	0.006	0.023	0.048	0.90	1.64
220 kV 母线谐波电流越限占比 C_{51}	0.00	100	0.014	0.029	0.018	2.13	1.55
110 kV 母线谐波电流越限占比 C_{52}	0.69	90.8	0.007	0.027	0.019	1.56	1.19
35 kV 母线谐波电流越限占比 C_{53}	1.83	75.6	0.005	0.019	0.020	0.90	0.94
10 kV 母线谐波电流越限占比 C_{54}	2.56	65.87	0.003	0.019	0.019	0.73	0.74
220 kV 线路满足新能源接入保护配置条件占比 C_{61}	100	100	0.039	0.024	0.048	3.13	4.31
110 kV 线路满足新能源接入保护配置条件占比 C_{62}	90.34	90.34	0.021	0.019	0.020	1.80	1.86
35 kV 线路满足新能源接入保护配置条件占比 C_{63}	70.23	70.23	0.014	0.019	0.019	1.14	1.13
10 kV 线路满足新能源接入保护配置条件占比 C_{64}	40.84	60.56	0.010	0.019	0.019	0.87	0.88
220 kV 及以下新能源接入裕度 D_{11}	66.24	86.24	0.098	0.029	0.028	5.47	5.41
110 kV 及以下新能源接入裕度 D_{12}	95.86	97.93	0.053	0.023	0.042	3.72	4.65
35 kV 及以下新能源接入裕度 D_{13}	92.46	100	0.035	0.022	0.030	2.85	3.21
10 kV 及以下新能源接入裕度 D_{14}	92.45	100	0.025	0.023	0.020	2.37	2.27
220 kV 及以下新能源规划目标可承载度 D_{21}	83.77	83.77	0.059	0.020	0.018	3.27	3.19
110 kV 及以下新能源规划目标可承载度 D_{22}	47.66	47.66	0.032	0.020	0.025	1.24	1.35
35 kV 及以下新能源规划目标可承载度 D_{23}	67.00	67	0.021	0.019	0.018	1.33	1.31
10 kV 及以下新能源规划目标可承载度 D_{24}	81.56	90.78	0.015	0.019	0.020	1.54	1.59
电网统调最大用电负荷时刻消纳新能源能力 D_{31}	74.26	42.77	0.021	0.027	0.018	1.03	0.84
电网统调最小用电负荷时刻消纳新能源能力 D_{32}	-32.92	0	0.055	0.022	0.033	0.00	0.00
弃风率 D_{33}	0.00	100	0.004	0.029	0.018	1.67	1.09
弃光率 D_{34}	0.00	100	0.004	0.029	0.018	1.67	1.09

表 2 一级和二级指标的相关计算数据
Table 2 Related calculation data of the first-level and second-level indicators

一级指标	二级指标	指标权重		指标得分	
		一级	二级	一级	二级
接入水平 A	新能源接入水平 A_1	0.075	0.075	5.08	5.08
	新能源装机可控性 B_1		0.066		5.83
协调水平 B	源储协调性 B_2	0.134	0.034	10.57	2.13
	新能源出力与负荷协调度 B_3		0.034		2.61
适应水平 C	电网安全 C_1		0.059		4.80
	负载情况 C_2		0.070		5.17
	短路电流 C_3	0.438	0.091	35.52	7.55
	电压质量 C_4		0.077		5.74
	谐波电流 C_5		0.060		5.32
	继电保护 C_6		0.081		6.94
承载水平 D	新能源接入裕度 D_1		0.155		14.41
	新能源规划目标可承载度 D_2	0.353	0.101	26.16	7.38
	消纳新能源能力 D_3		0.097		4.37

2) 在权重设置方面,传统评价模型的客观权重设定方法一般是熵权法^[23-24],该方法的基本思路是根据指标所含信息有序程度的差异性来确定指标权重,其本身无法处理强相关性的指标,也不能考虑指标间的互动关系,因此不能充分体现指标的实际重要性。而 CRITIC 法不仅考虑了指标变异大小影响,而且考虑了指标间的冲突性;指标变异性以标准差体现,标准差越大,方案间的取值差距越大;指标冲突性以皮尔逊相关系数为基础,若两个指标有较强的正相关,两个指标冲突性较低,权重也越小。

如图 2 所示,以三级指标 A_{11} 和 C_{51} 为例,当新

能源渗透率不高时,220 kV 母线谐波电流越限占比不受其影响;当渗透率达到一定水平时,220 kV 母线谐波电流越限占比将随之升高。当两者不相关时(相关系数为 0),采用 CRITIC 法得到两个指标的客观权重分别为 0.0184 和 0.0271,采用熵权法得到两个指标的客观权重分别为 0.0192 和 0.0176。当两个指标相关系数增大时,采用 CRITIC 法时两个指标客观权重呈下降趋势,而采用熵权法时 C_{51} 指标权重明显升高。一般而言,当两个指标强相关时,应适当降低指标权重甚至去除某一指标。由于大规模新能源并网时作用机理较为复杂,新能源接入率、渗透率与各电压等级电网的重过载、 $N-1$ 通过率、电能质量等指标间存在一定的关联性,因此,在设置

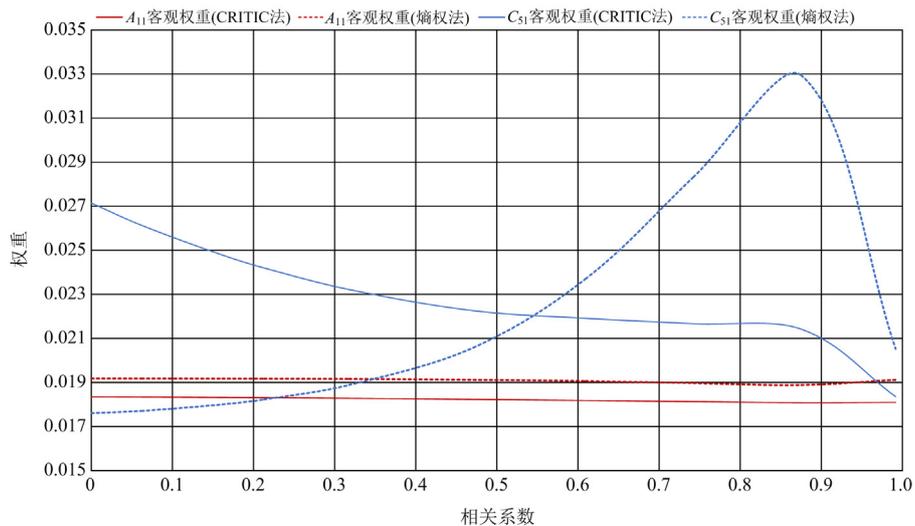


图 2 客观权重设置方法对比

Fig. 2 Comparison of objective weight setting methods

指标权重时需要充分考虑指标间的冲突性和变异性,故 AHP-CRITIC 法是一种更适合的主客观赋权法。

4.3 评价结果和发展重点

如表 2 所示,该城市大规模新能源接入时电网性能水平综合评分为 77.33,准则层的评价结果和发展重点如下。

1) 接入水平 A

接入水平得分 5.08,得分率偏低。主要原因是新能源装机容量偏高、电网统调最小用电负荷时刻消纳新能源能力不足,需要外送,导致三级指标中新能源接入率 A_2 评分为 52.41,偏低。若要提高接入水平,选取评分较低的指标并计算灵敏度,如图 3 所示,根据指标灵敏度高低确定发展重点顺序为:新能源渗透

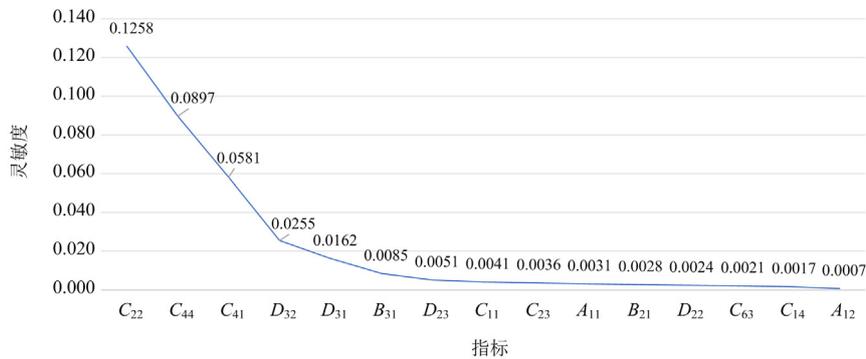


图 3 指标灵敏度排序

Fig. 3 Sensitivity ranking of indicators

3) 适应水平 C

适应水平得分 35.52,得分率较高。二级指标中负载情况 C_2 、电压质量 C_4 得分分别为 5.17、5.74,得分率不高。主要原因春腰、秋腰时刻,新能源大发、用电负荷较小,电能需要外送,导致 35~220 kV 线路和主变重过载情况较多,负载率得分较低;加上新能源发电具有波动性和间歇性,导致电网电压越限情况较多。根据灵敏度确定发展重点顺序为:110 kV 重载设备占比 C_{22} (0.1258) > 10 kV 母线电压越限占比 C_{44} (0.0897) > 220 kV 母线电压越限占比 C_{41} (0.0581) > 220 kV 电网 N-1 通过率 C_{11} (0.0041) > 35 kV 重载设备占比 C_{23} (0.0036) > 35 kV 线路满足新能源接入保护配置条件占比 C_{63} (0.0021) > 10 kV 线路 N-1 通过率 C_{14} (0.0017)。即可通过合理分配负荷、优化 35~220 kV 网架结构、加强 10 kV 电网转供能力建设、提高 10 kV 和 220 kV 无功补偿等措施,提高电网对大规模新能源接入时的适应性。

4) 承载水平 D

承载水平得分 26.16,二级指标中消纳新能源能

率 A_1 (0.0031) > 新能源接入率 A_2 (0.0007),即优先考虑新能源就地消纳,提高新能源渗透率水平。

2) 协调水平 B

协调水平得分 10.57,二级指标中源储协调性 B_2 、新能源出力与负荷协调度 B_3 得分分别为 2.13 和 2.61,得分率不高。三级指标中,储能占新能源装机比例 B_{21} 、新能源出力与年负荷曲线匹配度 B_{31} 得分偏低。若要提高协调水平,根据灵敏度确定发展重点顺序为:新能源出力与年负荷曲线匹配度 B_{31} (0.008) > 储能占新能源装机比例 B_{21} (0.003)。即可通过增加可控负荷、提升储能配置等方式,改善负荷和新能源的出力曲线,增加源荷全年出力的匹配度。

力 D_3 、新能源规划目标可承载度 D_2 得分分别为 4.37、7.38,得分率不高。由于该城市风能、太阳能发电站较多,本地消纳有限,且未来 35~110 kV 电网对大规模新能源承载能力有限,根据灵敏度确定发展重点顺序为:电网统调最小用电负荷时刻消纳新能源能力 D_{32} (0.0255) > 电网统调最大用电负荷时刻消纳新能源能力 D_{31} (0.0162) > 35 kV 及以下新能源规划目标可承载度 D_{23} (0.0051) > 110 kV 及以下新能源规划目标可承载度 D_{22} (0.0024)。

5 结论

本文构建了大规模新能源接入的电网性能评价指标体系,通过实际电网验证,该指标体系具有较强的实用性和有效性,通过研究得到如下结论。

1) 大规模新能源接入电网的评价指标体系不仅考虑了新能源随机性和波动性对电网电能质量、安全稳定的影响,而且还考虑了新能源承载能力以及储能的积极作用,贯穿了源网荷储各个环节,能够更真实、全面地对电网消纳新能源能力进行评价。

2) 由于当前处于新型电力系统发展阶段,大规

模新能源以及储能、电动汽车充电桩等多元负荷接入电网时,作用机理较为复杂,电网安全、重过载、承载力等电网性能方面指标间存在冲突性和变异性,采用 AHP-CRITIC 法不仅能够兼顾专家经验,而且能够充分利用电网发展数据自身的客观属性,使各项指标权重取值更加合理。同时还能够根据资源禀赋不同改变指标的相对重要性,促进电网差异化发展。

3) 在大规模新能源接入时,电网性能评价是一个属性多样、关系复杂的决策问题,需要立足电网已接入新能源情况,对源网负荷/出力特性匹配程度、大规模新能源并网影响以及电网对新能源承载能力进行全面评估,利用电网规划、发展、运行等多源数据,显性表达各个指标的统计或计算方式,保证评价体系的实操性和评价结果的真实性。

参考文献

- [1] 习近平. 中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. [2021-03-25]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
XI Jinping. The ninth meeting of the central financial leading group[EB/OL]. [2021-03-25]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [3] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1-8.
LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1-8.
- [4] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [5] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [6] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考[J]. 中国电力企业管理, 2021(25): 8-11.
GUO Jianbo. Thinking about challenges and mechanisms faced by new power system[J]. China Power Enterprise Management, 2021(25): 8-11.
- [7] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [8] 张立辉, 戴谷禹, 聂青云, 等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 154-163.
ZHANG Lihui, DAI Guyu, NIE Qingyun, et al. Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a carbon trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 154-163.
- [9] SALVIA M, RECKIEN D, PIETRAPERTOSA F, et al. Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality? An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 135: 110253.
- [10] 何璇, 高崇, 曹华珍, 等. 基于改进层次分析法的配电网指标评估[J]. 电测与仪表, 2022, 59(10): 93-99.
HE Xuan, GAO Chong, CAO Huazhen, et al. Index evaluation of distribution network based on improved analytic hierarchy process[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 93-99.
- [11] 白帆, 陈红坤, 陈磊, 等. 基于确定型评价指标的电力系统调度灵活性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 52-60.
BAI Fan, CHEN Hongkun, CHEN Lei, et al. Research on dispatching flexibility of power system based on deterministic evaluation index[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 52-60.
- [12] 施贵荣, 孙荣富, 丁华杰, 等. 大规模风电并网的评估指标体系构建与应用[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 841-848.
SHI Guirong, SUN Rongfu, DING Huajie, et al. Construction and application on evaluation index system of large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 841-848.
- [13] 杜明坤, 黄媛, 刘俊勇, 等. 考虑梯级电站开发规划接入的电网适应性综合评估[J]. 电力系统及其自动化

- 报, 2021, 33(9): 1-8.
- DU Mingkun, HUANG Yuan, LIU Junyong, et al. Comprehensive evaluation on grid adaptability considering the access of cascaded power stations under planning and development[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2021, 33(9): 1-8.
- [14] 王晓彬, 孟婧, 石访, 等. 煤电与清洁能源协同演进优化模型及综合评价体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 43-52.
- WANG Xiaobin, MENG Jing, SHI Fang, et al. An optimization model and comprehensive evaluation system for the synergistic evolution of coal-fired power plants and clean power sources[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 43-52.
- [15] 刘洪, 赵越, 刘晓鸥, 等. 计及能源品位差异的园区多能源系统综合能效评估[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2835-2843.
- LIU Hong, ZHAO Yue, LIU Xiaoou, et al. Comprehensive energy efficiency assessment of park-level multi-energy system considering difference of energy grade[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2835-2843.
- [16] 吴涵, 孙力文, 项晟, 等. 计及可再生能源与负荷高维时序相关性的主动配电网扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 40-51.
- WU Han, SUN Liwen, XIANG Sheng, et al. Expansion planning of active distribution network considering high-dimensional temporal correlation between renewable energy and load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 40-51.
- [17] 杨楠, 董邦天, 黄禹, 等. 考虑不确定性和多主体博弈的增量配电网源网荷协同规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2689-2701.
- YANG Nan, DONG Bangtian, HUANG Yu, et al. Incremental distribution network source-load collaborative planning method considering uncertainty and multi-agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2689-2701.
- [18] 唐巍, 张志刚, 张璐, 等. 考虑微能网聚合整形和资产利用率提升的配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 89-98.
- TANG Wei, ZHANG Zhigang, ZHANG Lu, et al. Distribution network planning considering aggregated shaping for micro-energy grids and improvement of asset utilization rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 89-98.
- [19] 张天翼, 王海风. 风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 177-187.
- ZHANG Tianyi, WANG Haifeng. Research methods for subsynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 177-187.
- [20] 梁琛, 王维洲, 马喜平, 等. 基于随机潮流的高比例新能源接入配电网的极限线损分析[J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 34-40, 78.
- LIANG Chen, WANG Weizhou, MA Xiping, et al. Analysis on limit line loss in high proportion of renewable energy distribution network based on stochastic power flow[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 34-40, 78.
- [21] 牡丹, 新能源发电与电网协调发展综合评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- DU Dan. Research on comprehensive assessment of coordinated development between new energy generation and power grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [22] 颜湘武, 梁白雪, 贾焦心, 等. 高渗透率光伏并网对系统暂态频率稳定性影响的量化评估[J]. 可再生能源, 2022, 40(9): 1232-1240.
- YAN Xiangwu, LIANG Baixue, JIA Jiaoxin, et al. Quantitative evaluation of transient frequency stability of high permeability photovoltaic grid connected system[J]. Renewable Energy Sources, 2022, 40(9): 1232-1240.
- [23] 戴国华, 戴睿, 张琪瑞, 等. 基于主客观赋权相结合的省级电网发展诊断分析方法与实证研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 110-118.
- DAI Guohua, DAI Rui, ZHANG Qirui, et al. Empirical study and analysis of provincial power grid development diagnosis based on the combination of a subjective and objective weighting method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 110-118.
- [24] 田春笋, 殷奕恒, 关朝杰, 等. 基于供电分区的中高压配电网综合评价策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 152-159.
- TIAN Chunzheng, YIN Yiheng, GUAN Chaojie, et al. Comprehensive evaluation strategy of medium and high voltage distribution network based on power supply division[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 152-159.

收稿日期: 2023-09-21; 修回日期: 2023-12-15

作者简介:

李响(1979—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电与并网技术、配电网规划。E-mail: nomad0729@163.com

(编辑 周金梅)