

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191022

基于组合赋权法的风电场无功电压控制能力综合评估

沈阳武¹, 祖文静², 梁利清¹, 张斌¹, 李勇², 彭衍建²

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410000;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为评估风电场无功电压控制能力, 构建了风电场无功电压控制能力双层评估体系, 介绍了一种基于概率统计的指标量化分级方法。基于标度扩展的层次分析法和优序图法两种主观赋权、熵权法和变异系数法两种客观赋权, 采用以偏差最小为目标的组合赋权法优化权重, 对湖南某实际风电场的无功电压控制能力进行综合评估, 验证了评估方法的有效性。评估结果可反映风电场无功电压控制能力的整体情况, 且组合权重能兼顾主观权重与客观权重的优点。

关键词: 风电场; 无功电压控制能力; 概率统计; 综合评估; 组合赋权法

Comprehensive evaluation of the reactive power and voltage control capability of a wind farm based on a combined weighting method

SHEN Yangwu¹, ZU Wenjing², LIANG Liqing¹, ZHANG Bin¹, LI Yong², PENG Yanjian²

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Research Institute, Changsha 410000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to assess the reactive power and voltage control capability of a wind farm, this paper builds a wind farm reactive power and voltage control double evaluation system, and introduces a quantitative classification method based on probability statistical indicators. Then, two subjective weights are obtained by a scale-extending analytic hierarchy process and precedence chart, and two objective weights are obtained by entropy weight and the coefficient of variation method. The weight is optimized by the combined weighting method aiming at the minimum deviation. The reactive power and voltage control capability of a real wind farm in Hunan Province is comprehensively evaluated. The effectiveness of the proposed evaluation method is verified. The evaluation results can reflect the overall situation of the reactive power and voltage control capability of the wind farm. In addition, the combined weights can take the advantage of subjective and objective weights into account.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51822702) and Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Company Limited (No. 5216A5170011).

Key words: wind farm; reactive power and voltage control capability; probability statistics; comprehensive assessment; combination weighting method

0 引言

由于风电出力的波动性, 其并网运行给电网的电压稳定带来诸如电压偏差、电压波动等问题^[1-4], 因此对风电场安全并网技术提出了更高的要求。目前的风电场需要具备无功调节能力等电网适应能力,

也为其参与电网调度与控制带来更多的可能^[5-6]。有效评估风电场无功电压控制能力(Reactive Power and Voltage Control Capability of Wind Farm, RPVCC-WF), 对实际风电场的改进和参与无功控制有参考价值, 有利于提高电网运行可靠性。

在 RPVCC-WF 研究方面, 文献[7]考虑到风速差异性统计分析了 RPVCC-WF, 并量化分析了风速差异性和风速预测误差对 RPVCC-WF 范围的影响; 文献[8]以局部电压稳定性 L 指标为基础, 研究了风

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51822702); 国网湖南省电力有限公司科技项目资助(5216A5170011)

电场静态电压稳定性;文献[9]基于熵权理论提出了一种多风电场无功补偿协调策略评价方法,从风场区域电网电压质量和经济性两个方面对多种无功补偿协调策略进行综合评估;文献[10]充分利用了各并网逆变器的无功调节能力,通过控制其下垂增益减小并网点的电压波动;文献[11]介绍了一种基于在线优化的快速模型预测控制方案在并网风电场无功电压控制中的应用。以上研究主要关注风电场的无功控制策略或对电压稳定的影响。在RPVCC-WF综合评估方面的研究较少。

综合评估的关键在于评估体系的建立与评估方法的选定。文献[12]从宏观需求指标集和微观评估指标集2个层次构建了智能配电网综合评估体系,基于反熵权法和改进灰色关联度法的组合赋权法进行评估;文献[13]的评估体系分为DG投运前电能质量分析、DG投运后电能质量监测两部分,采用数据包络分析法对分布式电源电能质量进行综合评估;文献[14]基于层次分析法和模糊逻辑利用多准则决策,对储能系统的运行进行评价。各种评估方法优缺点不一,因此有必要针对评估对象的特点选择合适的评估方法。

本文首先构建了包括核心层与扩展层的双层RPVCC-WF评估体系;其次介绍了一种以概率统计为基本思想的数据处理方法;然后介绍了综合评估流程,其中采用了标度扩展的层次分析法、优序图法、熵权法、变异系数法获得基础权重,采用一种基于偏差最小的组合赋权法优化权重;最后以湖南某实际风电场为例,对该风电场的无功电压控制能力进行了评估,验证了评估方法的有效性。

1 无功电压控制能力评估体系

评估指标是综合评估的基础,考虑到指标的系统性、代表性、权威性、可比性和易获性,本文根据影响RPVCC-WF的因素与风电场无功电压控制的效果,结合多个国家标准、行业标准、企业标准等标准文件,构建了RPVCC-WF评估体系,该体系主要由功率指标、电能质量指标和调节指标构成,如图1所示。

1.1 功率指标

功率指标反映风电场实时及未来的无功功率情况,风电场无功功率情况与其有功输出大小密切相关,将功率指标细化为实时无功裕度、有功变化、预测合格率、预测误差四个指标。

定义实时无功裕度指标 Q 为风电场实时无功大小(包括所有风电机组实时可发无功大小及无功配置大小之和)与风电场无功源额定容量之和的比,反

映风电场的实时可用无功大小,如式(1)。

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n q_i + Q_c}{Q_N} \quad (1)$$

式中: n 为风电场内风电机组数; q_i 为第 $i(i=1,2,L,n)$ 台风电机组能发出的实时可发无功大小,以永磁直驱风电机组为例, $q_i = \sqrt{s_i^2 - p_i^2}$, s_i 为第 i 台风电机组的变流器容量, p_i 为第 i 台风电机组的实时有功输出大小; $Q_N = S_N + Q_c$ 为风电场无功源额定容量,即风电场额定容量 S_N 与无功配置大小 Q_c 之和。

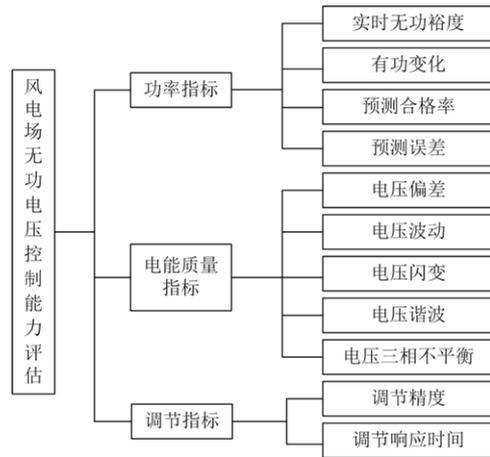


图1 RPVCC-WF 评估体系

Fig. 1 Evaluation system of RPVCC-WF

考虑到风电场实时无功功率的变化情况及未来无功裕度的预测情况,关注风电场的有功变化与功率预测能力,包括预测合格率和预测误差。预测指标对于风电场无功调度管理具有重要意义。

国标《GB/T 19963-2011》中有功变化包括风电场正常运行时的1 min有功变化和10 min有功变化,定义有功变化指标为风电场的1 min差值有功变化 Δp 与风电场装机容量 P_N 的比^[15]。

$$\Delta P = \Delta p / P_N \quad (2)$$

采用《Q/GDW 10588-2015》中风电场的短期预测月合格率 Q_R 表示预测合格率指标,风电场的短期预测均方根误差 E_{rms} 表示预测误差指标,反映功率预测的精度,分别如式(4)和式(5)所示。

$$B_i = \begin{cases} 1 & \frac{|P_{Mi} - P_{Pi}|}{S_{op}} < 0.25 \\ 0 & \frac{|P_{Mi} - P_{Pi}|}{S_{op}} \geq 0.25 \end{cases} \quad (3)$$

$$Q_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i, i=1, L, n \quad (4)$$

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{Mi} - P_{Pi})^2} / S_{\text{op}} \sqrt{n}, i=1, L, n \quad (5)$$

式中: n 为所有样本个数; P_{Mi} 为 i 时刻的实际功率; P_{Pi} 为 i 时刻的预测功率; S_{op} 为风电场的开机总容量。

1.2 电能质量指标

风电场内通常配备 SVG 和无源滤波装置, 在实现无功动态补偿的同时, 还可实现对电压波动、闪变、谐波及电压不平衡等电能质量的综合治理。因此, 本文在对风电场无功电压调节能力综合评估的同时, 还需考虑其电能质量指标, 使评估更加全面准确。这里, 电能质量指标主要包括电压偏差、电压波动、电压闪变、电压谐波、电压三相不平衡五个指标。

电压偏差 ΔU 反映实际运行电压对系统标称电压的偏差程度, 如式(6)。

$$\Delta U = |(U - U_N) / U_N| \quad (6)$$

式中: U 为风电场并网点电压; U_N 为风电场并网点额定电压。

采用电压变动 d 作为电压波动指标值, 反映并网点电压一系列的变动或连续的改变。

$$d = \frac{\Delta u}{U_N} \times 100\% \quad (7)$$

式中, Δu 为电压方均根值曲线上相邻两个极值电压之差。

电压闪变采用长时间闪变值 P_{lt} 反映风电场并网点的电压闪变情况, 如式(8)、式(9)所示, P_{lt} 由一段时间内的短时间闪变值 P_{st} 计算得到, P_{st} 是由反映人的视觉对电压波动的瞬时闪变感觉水平的值 $S(t)$ 的积累概率函数 CPF 曲线获得, 其记录周期为 10 min。

$$P_{\text{lt}} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{\text{st}j})^3} \quad (8)$$

$$P_{\text{st}} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (9)$$

式中: n 为某段时间内包含的短时间闪变值个数; $P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 、 P_{50} 分别为 CPF 曲线上等于 0.1%、1%、3%、10% 和 50% 时间的 $S(t)$ 值。

风电机组在工作时, 不可避免的会产生谐波。采用电压总谐波畸变率 THD_u 作为电压谐波指标, 反映风电场并网点电压畸变情况, 如式(10)所示。

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{\sqrt{(U_1)^2}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: U_h 为第 h 次谐波电压的方均根值; U_1 为基波电压的方均根值。

采用风电场并网点三相电压负序不平衡度测量值 ε_{U_2} 作为三相电压不平衡指标。

$$\varepsilon_{U_2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (11)$$

式中: U_2 为三相电压的负序分量方均根值; U_1 为三相电压的正序分量方均根值。

1.3 调节指标

调节指标反映风电场收到无功或电压调节指令后的调节性能, 包括调节精度和调节响应时间两个指标。

参考《GB/T19963-2011》、《Q/GDW1878-2013》定义调节精度 ΔV 为无功电压调节后最终无功/电压稳态值 U_i 和指令目标值 U_T 之差与指令目标值的比。调节响应时间 T_V 为无功/电压调节指令输入到风电场实际无功/电压的变化量达到控制偏差量(控制目标值与初始值之差)的 90% 所需的时间。

2 基于概率统计的指标量化分级

不同指标间可能存在量纲、数量级或类型不相同的情况, 会给综合评估带来影响, 且 RPVCC-WF 的好与坏并没有绝对分明与固定不变的界限, 因此需要量化指标并给指标的评估结果分级。

指标的量化分级需将所有指标转换为区间标度的指标, 由此消除指标间量纲、数量级或类型不相同带来的影响。本文采用概率统计的思想对评估指标进行量化分级处理^[16-17]。

将各指标的评估结果根据该指标在标准中的限值分为五个区间等级, 分别为: “优质”、“良好”, “一般”、“合格”、“不合格”, 其中, “不合格”指该指标超出标准文件规定限值。若该指标没有规定限值, 就将其理论值域分为前四个区间等级。对于极小型指标(其值越小越好), 指标值所在区间由小至大分别对应“优质”~“不合格”; 对于极大型指标(其值越大越好)则相反。

统计由基础数据获得的第 j 个指标数据在第 i 个区间的概率值 $P_i(j)$, 加权平均得到指标的评估结果 $R(j)$, 如式(12)所示。根据表 1 判断 $R(j)$ 处于哪个区间来对指标进行评估, 评估结果 $R(j)$ 越小越好。由 n 个指标在 m 个区间等级的所有概率值组成

原始数据矩阵 X , 如式(13)所示。

$$R(j) = \sum_{i=1}^m (i \times P_i(j)) / \sum_{i=1}^m P_i(j) \quad (12)$$

$$X = \begin{bmatrix} P_1(1) & P_1(2) & \dots & P_1(n) \\ P_2(1) & P_2(2) & \dots & P_2(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_m(1) & P_m(2) & \dots & P_m(n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

表 1 评估结果分级

Table 1 Grading of assessment results

等级	优质	良好	一般	合格	不合格
评估结果	1~1.8	1.8~2.6	2.6~3.4	3.4~4.2	4.2~5

RPVCC-WF 评估体系中, 实时无功裕度与预测合格率指标为极大型指标, 其余均为极小型指标。以有功变化指标为例, 标准文件《GB/T 19963-2011》规定装机容量为 50 MW 的风电场 1 min 有功变化最大限值为其装机容量的 1/10, 因此, 指标有功变化 ΔP 的限值为 0%~10%, 根据限值划分五个区间等级, 分别为“优质”: $0\% \leq \Delta P < 2.5\%$, “良好”: $2.5\% \leq \Delta P < 5\%$, “一般”: $5\% \leq \Delta P < 7.5\%$, “合格”: $7.5\% \leq \Delta P < 10\%$, “不合格”: $10\% \leq \Delta P$ 。统计基础数据中有功变化 ΔP 出现在每个区间的概率, 由式(12)计算 $R(\Delta P)$, 根据表 1 判断有功变化 ΔP 的评估结果。

风电场的综合评估结果 R 也分为“优质”、“良好”、“一般”、“合格”、“不合格”五个区间等级, 如式(14)所示, R 由各指标的评估结果加权求和得出。同样根据表 1 判断其处于哪个区间来进行等级评估, 其值越小越好。

$$R = \sum_{j=1}^n (w_j \times R(j)) \quad (14)$$

式中, w_j 为各指标权重。

3 综合评估流程

综合评估中, 赋权方法的选择将直接影响最终评估结果。RPVCC-WF 指标的重要程度需要专业人员包括风电场无功功率的生产者与使用者根据电网现况确定, 由此确定的主观权重虽体现了专业人员的经验喜好, 但其判断标准有差异且无法反应指标的数字特征。目前由广域监测系统、风电场运行监测系统数据平台可获得 RPVCC-WF 指标的大量数据, 为传递数据的有效信息, 可通过定量分析给指标客观赋权, 但客观赋权易受数据随机性的影响且可能出现重要指标权重小或不重要指标权重大的情况^[18]。为兼顾专业人员的经验偏好与指标数据的客观特征, 常使用组合赋权法^[19-20]。对于 RPVCC-WF,

采用组合赋权法组合多组赋权方法所得主观与客观权重获得一组优化权重^[19]。

本文采用标度扩展的层次分析法 AHP(Analytical Hierarchy Process)^[20]、优序图法 PC(Precedence Chart)^[21]两种主观赋权法、熵权法 EP(Entropy Weight)^[19]、变异系数法 CV(Coefficient of Variation Method)^[19]两种客观赋权法获得基础权重, 以基础权重间离差最小为优化目标求解得出的组合权重作为最终权重, 评估流程如图 2 所示。

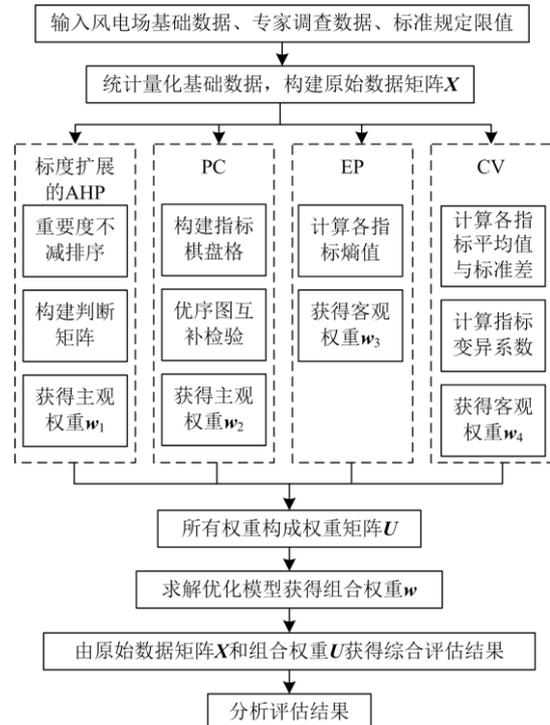


图 2 RPVCC-WF 评估流程图

Fig. 2 Evaluation flow chart of RPVCC-WF

由图 2 可知, 首先是数据获取与处理阶段, 即获取风电场的基础数据、专家调查数据、标准规定限值等, 并基于概率统计量化数据, 构成原始数据矩阵 X 。然后求取权重, 通过标度扩展的 AHP、PC、EP、CV 四种方法求得基础权重构成权重矩阵 U , 如式(15)所示, $u_{ij} (i=1,2,L,11; j=1,2,L,4)$ 表示第 j 种赋权法中第 i 个指标的权重值。以偏差最小为优化目标, 权重不小于 0 且和为 1 作为约束条件, 如式(16)所示, 建立数学优化模型。求解优化模型, 即可得到组合权重 w 。最后由式(12)、式(14)得出最终评估结果并对结果进行分析。

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{111} & u_{112} & \dots & u_{114} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \min f = \sum_{l=1}^4 \sum_{j=1}^{11} \sum_{i=1}^5 ((u_{ij} - w_j)gx_{ij})^2 \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^{11} w_j = 1, w_j \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中： u_{ij} 为第 l 种赋权法中赋予第 j 个指标的权重； w_j 为组合赋权法中第 j 个指标的权重值； x_{ij} 为原始数据矩阵 X 的元素。

4 算例分析

本文以湖南某风电场为例，对其无功电压调节能力进行综合评估，该风电场的装机容量为 50 MW，共安装 25 台单机容量为 2 MW 的永磁直驱风电机组。风电机组经 35 kV 集电线路汇集送入升压变，再经风电场主变压器汇集升压后并入 110 kV 电网。该风电场配置的 SVG 无功调节范围为 -5~5 Mvar，无源滤波装置的容量为 5 Mvar。在风电场并网点测得夏季某日的功率与电能质量数据作为基础数据展开评估。

在各标准规定中，该风电场各指标限值如表 2 所示。基于概率统计处理基础数据得到原始数据矩阵 X ，如式(17)所示。矩阵 X 每列代表一个指标，分别为：实时无功裕度、有功变化、预测合格率、

预测误差、电压偏差、电压波动、电压闪变、电压谐波、电压三相不平衡、调节精度、调节响应时间；每行代表一个等级，分别为“优质”、“良好”、“一般”、“合格”、“不合格”。根据式(12)得到风电场各指标的评估结果 $R(1) \sim R(11)$ ，各指标评估结果等级如表 3 所示。由原始数据矩阵 X 和表 3 可知，风电场的实时无功裕度一般较大，预测合格率不符合标准，电压偏差问题严重，调节精度与调节响应时间都不理想。与实际风电场调研结果相符。

表 2 风电场指标限值

Table 2 Index limit of the wind farm

指标	限值	参考标准文件
实时无功裕度	0%~100%	—
有功变化	0%~10%	《GB/T 19963-2011》
预测合格率	80%~100%	《Q/GDW 10588-2015》
预测误差	0%~20%	《Q/GDW 10588-2015》
电压偏差	-3%~+7%	《GB/T 19963-2011》
电压波动	0%~1%	《GB/T 12326-2008》
电压闪变	0~1	《GB/T 12326-2008》
电压谐波	0%~2%	《BG/T14549-1993》
电压三相不平衡	0%~4%	《GB/T 15543-2008》
调节精度	-0.5%~+5%	《GB/T 19963-2011》
调节响应时间	0~30 s	《GB/T 19963-2011》

$$X = \begin{bmatrix} 0.8791 & 0.7146 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.9990 & 0.9306 & 0.6002 & 0.9965 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.1209 & 0.1924 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0004 & 0.0278 & 0.3984 & 0.0035 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0597 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0069 & 0.0013 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0271 & 0.0000 & 0.2500 & 0.2538 & 0.0001 & 0.0139 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0062 & 1.0000 & 0.7500 & 0.7462 & 0.0003 & 0.0208 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad (17)$$

表 3 指标评估结果等级

Table 3 Grade of index evaluation result

	实时无 功裕度	有功 变化	预测 合格率	预测 误差	电压 偏差	电压 波动	电压 闪变	电压 谐波	电压三相 不平衡	调节 精度	调节响 应时间
	$R(1)$	$R(2)$	$R(3)$	$R(4)$	$R(5)$	$R(6)$	$R(7)$	$R(8)$	$R(9)$	$R(10)$	$R(11)$
评估结果	1.12	1.42	5	4.75	4.75	1	1.17	1.4	1	5	5
等级	优质	优质	不合格	不合格	不合格	优质	优质	优质	优质	不合格	不合格

如表 4 所示，根据专家意见，由标度扩展的 AHP 和优序图法分别得到主观权重 AHPW 和 PCW，基于原始数据矩阵 X ，由嫡权法和变异系数法分别得到客观权重 EPW 和 CVW，构成 4 行 11 列的权重矩阵 U ，求解优化模型得出组合权重 CW。根据式(14)由组合权重 CW 与各指标的评估结果 $R(1) \sim R(11)$ 得到 RPVCC-PF 的最终评估结果 $R = 3.016$ ，该风电场的 RPVCC 一般。

综合考虑指标权重与指标评估结果，若要提高该风电场的 RPVCC，需以优化调节精度、调节响应时间、电压偏差方面为主，优化功率预测合格率、预测误差为辅，比如提高风电场无功电压控制系统的性能、加快风电场的无功响应时间以及改进功率预测算法等。通过实地调研，还了解到由于夏季天气炎热，该风电场的 SVG 因温度限制无法投用，解决该问题也是提高 RPVCC-PF 的关键之一。

表 4 不同方法中各指标权重

Table 4 Weight factor of each index in different methods

	实时无功裕度	有功变化	预测合格率	预测误差	电压偏差	电压波动	电压闪变	电压谐波	电压三相不平衡	调节精度	调节响应时间
AHPW	0.078 9	0.065 7	0.054 8	0.045 7	0.114 7	0.055 3	0.095 6	0.079 7	0.066 4	0.187 2	0.156 0
PCW	0.083 3	0.055 6	0.013 9	0.013 9	0.266 7	0	0.2	0.133 3	0.066 7	0.083 3	0.083 3
EPW	0.086 8	0.052 8	0.112 6	0.073 2	0.072 9	0.112	0.088 7	0.064 9	0.110 9	0.112 6	0.112 6
CVW	0.090 1	0.069 7	0.105 1	0.076 6	0.076 3	0.105 0	0.096	0.066 4	0.104 7	0.105 1	0.105 1
CW	0.085 2	0.061 1	0.072 1	0.052 3	0.133 5	0.068 0	0.120 5	0.086 1	0.087 3	0.122 4	0.114 3

RPVCC-WF 综合评估考察的是各个指标的整体情况, 不能反映出某些指标的极值、95%概率值等情况。表 5 列出了各指标的最大值、最小值、平均值和 95%概率值。对比分析指标限值、评估结果、指标极值可知, 风电场的实时无功裕度平均值较大, 预测合格率最大值、调节精度与调节响应时间最小值也不满足规定, 预测误差、电压偏差平均值均不满足规定, 与综合评估结果一致。但有功变化、电压波动、电压闪变、电压三相不平衡指标虽然综合评估为优质, 却存在越限的情况, 因是偶然越限, 对综合评估影响不大。综合评估能够反映 RPVCC-WF 的整体情况, 但不能反映偶然的极值越限情况。

表 5 风电场指标极值

Table 5 Extreme index value of wind farm

	最大值	最小值	平均值	95%概率值
实时无功裕度/%	1	0.52	0.92	0.99
有功变化/%	14.8	0	0	6.6
预测合格率/%	77.64	58.21	68.365	70
预测误差/%	27.34	17.44	23.29	26.1
电压偏差/%	9.02	0.25	7.59	8.52
电压波动/%	0.22	0	0.02	0.03
电压闪变/%	1.44	0.05	0.12	0.29
电压三相不平衡/%	11.46	0.01	0.36	0.68
调节精度/%	0.84	0.6	0.72	—
调节响应时间/%	220	214	217	—

将电压波动的各等级概率值修改为 $R(d) = [0, 0, 0, 0, 1]^T$, 即电压波动指标不合格, 再次评估风电场的无功电压控制能力, 评估结果与原评估结果的对比如表 6 所示。由表 6 可知, 对于电压波动指标数据的变动, 主观赋权法(AHP、PC)的评估结果差距较小, 而客观评估法(EP、CV)的差距较大, 能够反映出原始数据的波动, 组合赋权法能够体现出客观赋权法的优点。但是, 客观赋权法存在重要指标权重小或不重要指标权重大的情况, 如表 4 中电压偏差指标与功率预测合格率指标权重, 组合赋权法能够反映出专家经验中的指标的重要程度。组合赋权法兼顾主观赋权法与客观赋权法优点, 能对有数据波动的对象进行有效评估, 因此特别适用于对风电场、光伏等出力波动较强的新能源电站进行综合评估。

表 6 评估结果对比

Table 6 Comparison of evaluation results

	原评估结果	对比评估结果	差值
AHP	3.278	3.499	0.221
PC	2.894	2.894	0
EP	2.973	3.421	0.448
CV	2.918	3.337	0.419
CW	3.016	3.288	0.272

5 结论

本文提出了由功率指标、电能质量指标和调节指标构成的风电场无功电压控制能力评估体系, 采用概率统计的方法给评估结果分级, 通过基于偏差最小的组合赋权法给指标赋权, 既能考虑到专家经验等主观因素, 又能反映指标数据的动态变化, 提高了指标权重的合理性。评估结果可反映出风电场无功电压控制能力的整体情况, 为风电场的改进与电网的控制调度提供依据。通过算例验证了方法的有效性。在实际风电场评估中, 可更大范围的征求专家、用户等意见, 使主观权重更权威; 此外, 使用时间跨度更大的基础数据来计算可使客观权重更全面。也可针对多个风电场的某一指标或综合评估指标评估值进行对比, 为电网控制调度提供依据, 或为无功电压控制策略验证提供证明等。

参考文献

- [1] 明杰, 向红吉, 戴朝华, 等. 多风电场接入的灵敏度场景静态无功/电压评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 102-108, 115.
MING Jie, XIANG Hongji, DAI Chaohua, et al. Static reactive power/voltage assessment of sensitivity scenarios with multiple wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 102-108, 115.
- [2] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 108-114.
DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 108-114.
- [3] HOSSAIN M J, POTA H R, MAHMUD M A, et al.

- Investigation of the impacts of large-scale wind power penetration on the angle and voltage stability of power systems[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 76-84.
- [4] MATHE R M, FOLLY K A. Impact of large scale grid-connected wind generators on the power system network[C] // 2017 IEEE PES Power Africa, June 27-30, 2017, Accra, Ghana.
- [5] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [6] TUMMALA A S. Modified vector controlled DFIG wind energy system based on barrier function adaptive sliding mode control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 34-41. DOI: 10.1186/s41601-019-0119-3.
- [7] 黄国栋, 许丹, 丁强, 等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 162-170.
HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. Review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 162-170.
- [8] 李丹, 王昭光, 杨宁, 等. 考虑风速差异性时风电场无功调节能力分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 22-27.
LI Dan, WANG Zhaoguang, YANG Ning, et al. Analysis of reactive power regulation capacity of wind farm in considering wind speed difference[J]. Smart Power, 2018, 46(1): 22-27.
- [9] 闻宇, 谷君, 王宁. 基于L指标的风电场静态电压稳定性研究[J]. 电气应用, 2015(S2): 738-745.
- [10] 赵君, 陈继开. 一种多风电场区域无功补偿协调策略评价方法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(10): 50-54, 68.
ZHAO Jun, CHEN Jikai. An evaluation method for coordinated control strategies of reactive compensation in multiple wind farms area[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(10): 50-54, 68.
- [11] LI Y, XU Z, ZHANG J, et al. Variable droop voltage control for wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(1): 491-493.
- [12] AHMED H. Reactive power and voltage control in grid-connected wind farms: an online optimization based fast model predictive control approach[J]. Electrical Engineering, 2015, 97(1): 35-44.
- [13] 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 Xinjie, GE Shaoyun, LIU Hong, et al. Comprehensive assessment system and method of smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 40-46.
- [14] 付学谦, 陈皓勇, 刘国特, 等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4270-4276.
FU Xueqian, CHEN Haoyong, LIU Guote, et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4270-4276.
- [15] BARIN A, CANHA L N, ABAIDE A D R, et al. Selection of storage energy technologies in a power quality scenario — the AHP and the fuzzy logic[C] // 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, November 3-5, 2009, Porto, Portugal.
- [16] 牛海伟, 任永峰, 孙蕾, 等. 风电场有功功率最大变化率在线监测系统[J]. 电气技术, 2011(8): 35-37, 62.
NIU Haiwei, REN Yongfeng, SUN Lei, et al. On-line supervision system of the maximum variation rate of the wind farm active power[J]. Electrical Engineering, 2011(8): 35-37, 62.
- [17] 熊以旺, 程浩忠, 王海群, 等. 基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 48-52, 71.
XIONG Yiwang, CHENG Haozhong, WANG Haiqun, et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 48-52, 71.
- [18] 徐玖平, 李军. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [19] KARI T, GAO W, LU G, et al. Fault diagnosis model of power transformer based on improved grey relation method with combined weight[C] // 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016), May 28-29, 2016, Beijing, China.
- [20] 朱天瞳, 丁坚勇, 郑旭. 基于改进 TOPSIS 法和德尔菲—熵权综合权重法的电网规划方案综合决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 91-99.
ZHU Tiantong, DING Jianyong, ZHENG Xu. A comprehensive decision-making method for power network planning schemes based on the combination of the improved TOPSIS method with Delphi-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 91-99.
- [21] 杨宇. 多指标综合评价中赋权方法评析[J]. 统计与决策, 2006(7): 17-19.

收稿日期: 2019-08-24; 修回日期: 2019-10-31

作者简介:

沈阳武(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源并网控制、电力系统稳定分析; E-mail: shenyangwu@126.com

祖文静(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网控制、电力系统优化运行。E-mail: zuwenjing@hnu.edu.cn

(编辑 姜新丽)