

基于组合权重及属性区间法的主动配电网运行状态态势评估^①

翁国庆^② 舒俊鹏 谢方锐 龚阳光 张有兵

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 针对主动配电网(ADN)新特性及其自愈控制新要求,提出一种基于组合权重及属性区间法的 ADN 运行状态态势评估方法。在构建 ADN 运行状态态势评估指标体系的基础上,分别采用层次分析法(AHP)和变异系数法获取各评估指标的主观赋权和客观权重,并进一步基于最小二乘优化法实现组合权重赋值,然后提出基于属性区间理论的 ADN 运行状态态势评估方法。通过目标 ADN 中不同时刻的评估样本算例,分析验证了所提 ADN 运行状态态势评估方法的有效性、合理性和结果可观性。

关键词 主动配电网(ADN); 运行状态; 态势评估; 属性区间法; 组合权重

0 引 言

随着我国智能电网的不断发展,具有一定比例分布式可控资源、网络结构灵活性、控制与保护模式主动性、管理模式分散性特征的主动配电网(active distribution network, ADN)日益取代传统配电网成为未来智能配电网最重要的发展模式之一^[1]。良好的自愈控制能力是 ADN 突出优势,可使其始终运行在良好的状态,而实现对其运行状态准确有效的态势评估是 ADN 进行自愈控制的前提和关键内容^[2,3]。一方面,各类分布式电源(distributed generation, DG)的高渗透率接入和网络结构的灵活性,使其运行环境非常复杂,影响 ADN 运行状态因素众多,增加了其态势评估的难度;另一方面,ADN 所具备的更为广泛和智能的数据采集、理解感知能力又为 ADN 运行状态态势评估提供了良好基础和契机^[4]。因此,针对 ADN 运行新特征,构建其合理的运行状态态势评估指标体系、模型和方法,对于 ADN 自愈控制等主动控制决策具有重要意义。

在配电网运行状态评估的早期研究中,大部分

采用安全性、可靠性等单项指标来体现其整体水平^[5-7],一般以极限故障状态下系统仍然能够运行这一标准进行决策。但 ADN 运行状态的全面评估,还需关注其经济性、优质性等多维因素^[8],在 DG 广泛接入及能源互联网+的背景下,还需特别关注其适应性和网络安全性等^[9]。近几年,基于多指标体系的电网运行状态综合评估成为趋势。文献[10]采用基于变异系数法的距离综合评价方法对具有多个计量指标项系统进行综合评估,其原理简单,能有效利用原始数据信息,且可通过加权反映不同指标的重要性,但其综合评估结果仅可反映不同样本对象间的优劣排序。文献[11]提出了一种基于模糊层次分析法的能源互联网智能电网综合评价方法,可实现指标间相互作用的综合考虑,但权重赋值时采用的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)因其判断矩阵的构造具有较大程度的主观臆断性,从而使其综合评估结果的可信度下降。文献[12]针对电网运行的风险评估与定级体系进行了较深入的研究,但未进一步提出具体评价的模型和方法。文献[13]提出一种基于物元理论的智能电网风险评估模型,其核心的秩相关分析相比层次分析法具

① 国家自然科学基金(51777193)和浙江省自然科学基金(LY17E070005)资助项目。
② 男,1977 年生,博士,副教授;研究方向:智能电网,电能质量智能监控;联系人,E-mail: wgq@zjut.edu.cn
(收稿日期:2019-12-20)

有无需进行矩阵一致性判定的优势,但同样存在各指标间相对重要度赋值的主观性强缺陷。文献[14]基于属性数学理论提出一种配电网运行状态的评估方法,其引入的属性测度方法理论上可使多指标体系综合评估更具准确性,但其采用的指标权重赋值仍然为具有较大主观性的层次分析法,削弱了其整体评估结果的客观性。上述文献所提理论和方法,对于 ADN 运行状态态势评估时指标体系构建、指标间权重赋值和综合评估模型构建均具有重要的指导性,但在未来具有 DG 高渗透率的 ADN 背景下,不宜直接套用大电网或者传统配电网的评估指标、原则,评估模型及其权重赋值法也需更具合理性。因此,面对 DG 接入广泛、运行环境复杂、网络安全挑战严峻的 ADN 新特性^[15,16],如何构建适用性更佳的运行状态评估指标体系、模型和方法,具有很大的挑战性。

本文提出了一种基于组合权重及属性区间法的 ADN 运行状态态势评估方法。首先,介绍所提方法总体框架,并对其关键模块进行功能解释。其次,综合考虑系统安全性、可靠性、优质性、经济性、适应性和网络性的各维度细分指标,完成 ADN 运行状态态势评估指标体系的构建,并给出关键评价指标的量化表征式。然后,分别基于层次分析法和变异系数法求取各评估指标的主、客观权重,进一步分别基于最小二乘(least square method, LSM)优化法和遗传算法实现组合赋权优化模型的构建和求解。最后,提出基于属性区间理论的 ADN 运行状态态势评估方法。算例分析表明,所提出的运行状态态势评估方法可充分考虑 ADN 的多方面复杂新特性,有效综合利用主、客观权重和全面的隶属度信息,所得态势评估结果具有合理性、有效性和全面性。

1 ADN 运行状态态势评估系统框架

如图 1 所示,基于组合权重及属性区间法的 ADN 运行状态态势评估的系统框架,主要包括指标体系构建与样本数据获取、属性区间关键矩阵构建处理、组合赋权优化模型构建求解、运行状态辨识展示 4 个功能模块。

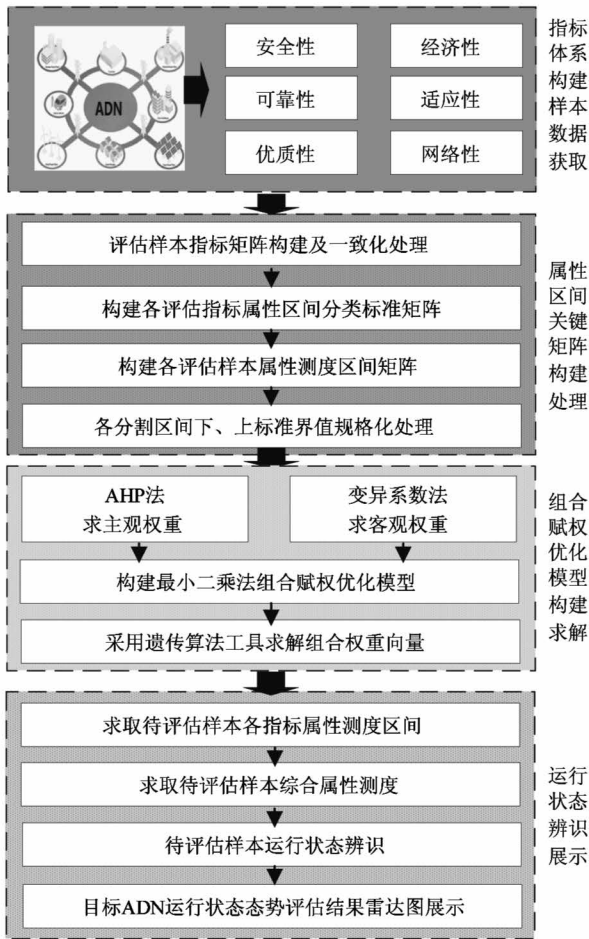


图 1 ADN 运行状态态势评估系统框架

各个功能模块的主要任务如下。

(1) 指标体系构建与样本数据获取模块。根据 ADN 新的特性和需求,综合考虑系统安全性、可靠性、优质性、经济性、适应性和网络性这 6 个维度并细分指标构建 ADN 运行状态态势评估指标体系,并依据各指标量化表征式获取目标 ADN 在各评估时段的样本数据信息。

(2) 属性区间关键矩阵构建处理模块。构建评估样本一致化指标矩阵,并依据所定义的运行状态属性空间有序分割构建各评估指标的属性区间分类标准矩阵和各评估样本的属性测度区间矩阵,进一步基于分割区间下、上标准界值的规格化处理获得其标准隶属度矩阵和相对隶属度矩阵。

(3) 组合赋权优化模型构建求解模块。分别采用 AHP 法和变异系数法求取各评估指标的主、客观权重值,然后采用最小二乘优化方法进行组合赋权优化模型构建,并基于遗传算法工具进行组合权重

向量的最优求解。

(4)运行状态辨识展示模块。通过构建属性测度函数求取得评估样本各指标的属性测度区间,进一步求取得评估样本对于各种运行状态的综合属性测度从而最终实现 ADN 运行状态的等级辨识,并通过雷达图形式实现态势评估结果的清晰展示。

2 ADN 运行状态态势评估指标体系构建

2.1 ADN 运行状态态势评估指标体系

ADN 运行状态态势评估的指标体系的构建需要遵循系统性、科学性、客观性、实用性原则,尽量体现能够综合反映其运行状况和特点的各项指标,并兼顾计算难度、数据处理等方面要求。根据 ADN 控制特点,可将其运行状态从劣至优划分为状态集

{紧急、恢复、异常、正常、优化}。进一步,为进行 ADN 运行状态健康程度的有效评估,可从系统安全性、可靠性、优质性、经济性、适应性和网络性这 6 个维度进行综合考量,且每个维度又可细分成若干具体指标。

综合考虑评估指标选取的一般原则性和样本数据的可获取性,构建的 ADN 运行状态态势评估指标体系如图 2 所示,该指标体系共分为 3 层。

第 1 层为目标层,即 ADN 运行状态,其功能为表征目标 ADN 的总体运行健康程度态势评估。

第 2 层为准则层,分为安全性、可靠性、优质性、经济性、适应性和网络性,每项准则均包含若干具体指标,其功能为实现态势评估所涉及的中间环节。

第 3 层为基础层,即态势评估所涉及的具体指标层,分属于不同的准则层项目,均为可直接获取或者间接计算、统计的可度量因子。

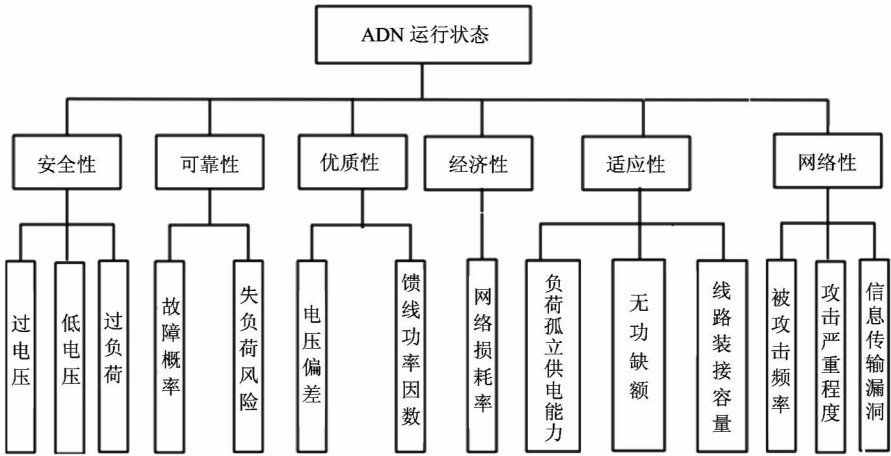


图 2 ADN 运行状态态势评估指标体系

2.2 核心评价指标的量化表征

为实现 ADN 运行状态的有效评估,图 2 所示评价指标体系中包含的各关键指标^[14],均需通过直接测量、间接计算或统计分析量化获取。特别是,相较于传统电网,DG 输出功率比值、网络信息传输安全性等方面的指标是 ADN 等智能配电网所特有的。

(1)安全性。过电压,其程度越高危害越大,采用所有节点中过电压程度最大值进行量化表征;低电压,其程度越低危害越大,采用所有节点中低电压程度最大值进行量化表征;过负荷,取支路电流与其最大允许载流量之比最大值进行量化表征。其计算

公式依次为

$$v_{sg} = \max \{ | v_{ig} - v_N | \} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

$$v_{sd} = \max \{ | v_{id} - v_N | \} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$K_{gh} = \max (\frac{I_z}{I_Z} \times 100\%) \quad z = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, v_{sg} 、 v_{sd} 和 K_{gh} 分别为过电压值,低电压值和过负荷值, v_{ig} 、 v_{id} 分别为第 i 个过电压、低电压节点电压, v_N 为额定电压, I_z 、 I_Z 分别为第 z 条支路电流与其最大允许载流量, m 为电压故障节点数, n 为线路支路数。

(2)可靠性。故障概率,故障信息的错误包括

漏报和误报 2 种,采用根据故障漏报和误报来建立故障概率的指标模型;失负荷风险,可由停电失负荷大小以及停电负荷的重要程度反映,采用加权的可能失负荷率计算。其计算公式依次为

$$P_{gz} = \begin{cases} P_{lb} & \text{漏报故障信息} \\ 1 - P_{wb} & \text{误报故障信息} \end{cases} \quad (4)$$

$$K_{sh} = \sum_{i=1}^n z_i \cdot \frac{P_{si}}{P_T} \times 100\% \quad (5)$$

式中, P_{gz} 和 K_{sh} 分别为故障概率值和失负荷风险值, P_{lb} 为开关设备故障但漏报信息的概率, P_{wb} 为开关实际未故障但误报信息的概率, n 为电网失电总节点数, P_T 为总负荷功率, P_{si} 和 z_i 分别为第 i 个失电节点的负荷大小和重要程度系数。

(3) 优质性。电压偏差,表征节点电压实际值与额定电压的偏差;馈线功率因数,采用所有馈线功率因数的最小值来表征。其计算公式依次为

$$\Delta v_i = \frac{|v_i - v_N|}{v_N} \times 100\% \quad (6)$$

$$\eta = \min(\cos\varphi_i) = \min(P_i/S_i) \quad (7)$$

式中, Δv_i 和 η 分别为电压偏差值和馈线功率因数, v_i 、 $\cos\varphi_i$ 、 P_i 和 S_i 分别为第 i 个节点的实际运行电压、功率因数、有功功率和视在功率。

(4) 经济性。选取网络损耗率体现,采用网络中损耗的电量与供电量之比进行量化表征:

$$K_{ws} = \frac{\sum_{i=1}^T P_{wi}}{w_T} \times 100\% \quad (8)$$

式中, K_{ws} 为网络损耗率值, w_T 为总时段内系统有功电量, P_{wi} 为 i 时段的有功损耗量, T 为计算总时段数。

(5) 适应性。负荷孤立供电能力,为在孤岛供电情况下 DG 输出功率与基本负荷的比值;分区无功缺额,表征站内外的无功平衡能力;线路装接容量,为配电变压器总容量与线路分段总数的比值。其计算公式依次为

$$K_{dg} = P_{dg}/P_{xt} \quad (9)$$

$$Q_{bc} = P_T \times (\sqrt{1 - \varphi_c^2}/\varphi_c - \sqrt{1 - \varphi_n^2}/\varphi_n) \quad (10)$$

$$C_R = \sum_{i=1}^m s_i / \sum_{i=1}^m d_i \quad (11)$$

式中, K_{dg} 、 Q_{bc} 和 C_R 分别为负荷孤立供电率值、分区无功缺额值和线路装接容量比值, P_{dg} 为 DG 输出功率, P_{xt} 为系统基本负荷总量, Q_{bc} 为需补偿的无功总和, φ_c 和 φ_n 分别为补偿前和补偿目标功率因数, C_R 为线路分段平均装接容量, m 为馈线总数, d_i 和 S_i 分别为第 i 条馈线的分段数和视在功率。

(6) 网络性。因信息通信技术广泛应用是 ADN 的重要特征,网络信息传输的“CIA”(保密性、完整性和可用性)状态评估成为新的内在需求。定义以下 3 项指标表征系统网络安全状况^[9]: (1) 被攻击频率,表征在限定时空内,系统整体运行、网内相关智能设备遭受外界攻击的次数; (2) 信息传输漏洞侵入率,表征网内智能设备间传输信息出现被电网黑客利用的漏洞情况; (3) 攻击严重程度,表征系统遭受到攻击后能否及时修复的能力。依次构建其计算公式为

$$F_{at} = \frac{N_{um_att}}{T \cdot N_{zn}} \quad (12)$$

$$\eta_{bug} = \frac{N_{b_att}}{N_{b_all}} \times 100\% \quad (13)$$

$$L_{at} = \rho_{at} \cdot T_{at} \cdot \frac{N_{od_at}}{N_{all}} \quad (14)$$

式中, F_{at} 、 η_{bug} 和 L_{at} 分别为被攻击频率值、信息传输漏洞侵入率值和攻击严重程度值, N_{um_att} 为统计时间段 T 内目标 ADN 到遭受网络攻击的次数, N_{zn} 为网内接入智能设备的节点数, N_{b_att} 、 N_{b_all} 分别为统计时间段目标 ADN 被黑客利用的漏洞数与检测到的总漏洞数, ρ_{at} 为损失程度系数, T_{at} 为损失持续时间, N_{od_at} 和 N_{all} 分别为遭受损失节点数与系统总节点数。

3 态势评估指标体系的组合赋权

指标体系的权重向量确定是 ADN 运行态势评估的核心环节,其合理程度直接影响评估结果的可信度、合理性。主观赋权法以专家学者的理论和实践为依据做出主观性决策,可较好体现指标自身的重要性程度,一般不受具体数值的影响;客观赋权法以具体的实际数据作为基础,能较好体现数据内蕴含的信息^[17]。本文首先分别采用层次分析法和变

异系数法进行主观赋权和客观赋权,然后基于最小二乘法构建组合赋权优化模型,实现主、客观赋权法各自优点的综合兼顾,使系统评估体系权重向量值分配更加合理。

(1)基于 AHP 法实现系统指标体系主观赋权。首先根据 ADN 的特征选取与评估目标相符的评估指标,分析各个指标之间的关联性与独立性,形成图 2 所示的层次结构模型;然后构造模型上下层指标的比较判断矩阵,比较两两指标间的相对重要关系获得判断矩阵 $\mathbf{R}$,并进而利用式(15)进行判断矩阵的一致性检验;最后基于式(16)依次递进,计算出系统层次结构模型中最底层 14 项指标对于目标 ADN 运行状态目标层的权重值。

$$CR = \left(\frac{\lambda_{\max} - n_R}{n_R - 1} \right) / RI \quad (15)$$

$$\beta_s = \sum_{r=1}^R \rho_{sr} \cdot \rho_r \quad (16)$$

式中, n_R 为判断矩阵阶数, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征根, RI 为矩阵平均随机一致性指标, CR 为定义的一致性比率,经检验其值小于 0.1 时,权重向量才能满足一致性检验要求, ρ_r 为第 $k-1$ 层中第 r 个指标项相对于目标层的权重 ($r \in [1, R]$), ρ_{sr} 为第 k 层中第 s 个指标相对于 $k-1$ 层中第 r 个指标的权重向量 ($s \in [1, S]$), β_s 为第 k 层第 s 个指标项相对于目标层的权重值, R, S 分别为第 $k-1$ 层、第 k 层中的状态指标项个数。

(2)基于变异系数法实现系统指标体系客观赋权。采用变异系数法的基本思路是利用其可实现对目标 ADN 实际采集指标数据中标准偏差越大的指标分配越大的权重的特性^[18]。考虑到图 2 所示评估指标体系中的各项指标的量纲不同,按式(17)定义各项指标的变异系数以量化其各自的差异程度;然后基于式(18)求取目标 ADN 运行状态态势评估指标体系中各项指标的客观权重。

$$\zeta_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

$$\gamma_j = \frac{\zeta_j}{\sum_{j=1}^m \zeta_j} \quad (18)$$

其中, $\bar{x}_j$ 和 σ_j 分别为第 j 个指标项的平均值和标准

差值, ζ_j 和 γ_j 分别为经计算获得的第 j 个指标项的变异系数值和客观权重值。

(3)系统指标体系主客观组合赋权优化模型构建和求解。首先将由式(16)和(18)分别求得各指标对应主观权重值和客观权重值表征为式(19)所示的权重向量形式,然后构建用于求取目标 ADN 运行状态态势评估指标体系中各指标对应的主客观组合权重值的基于最小二乘法优化模型^[19],如式(20)所示;最后,基于 Matlab 软件提供的遗传算法工具箱,可通过调用其遗传算法 $ga()$ 函数或 GUI 图形用户界面进行数值计算和优化求解^[20]。

$$\mathbf{W}_\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \dots \\ \gamma_m \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{W}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{ [(\beta_j - \omega_j) x_{ij}^*]^2 \\ + [(\gamma_j - \omega_j) x_{ij}^*]^2 \} \\ \text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad 0 \leq \omega_j \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{W}_\beta$ 、 $\mathbf{W}_\gamma$ 分别为定义的主观权重向量和客观权重向量, $F(\mathbf{W})$ 为 LSM 优化函数值, ω_j 、 β_j 和 γ_j 分别为第 j 个指标项的综合、主观和客观权重值, x_{ij}^* 为第 i 组评估样本数据中第 j 个指标项的一致化数值。

4 基于属性区间法的运行状态态势评估

4.1 属性区间模型构建

属性识别理论采用置信度准则辨识方法,因其考虑了属性集合的有序性,特别适用于解决多指标、多模拟属性的综合评估问题^[21]。因此,本文采用属性区间方法进行 ADN 运行状态的态势评估。

设定已通过数据采集、计算或统计方法获取目标 ADN 中 n 个运行数据作为评估样本 X_i ($1 \leq i \leq n$),可以是取自同一个 ADN 区域不同 n 时刻(纵向比对),也可以是取自同一时刻 n 个不同 ADN 区域(横向比对);每组样本数据中均包含 m 个指标项 I_j ($1 \leq j \leq m$),则可构建评估样本指标矩阵 $\mathbf{X} =$

$[x_{ij}]_{n \times m}$, x_{ij} 为第 i 个时刻第 j 个指标项的实际量化值。同时,将 ADN 运行状态态势评估的属性空间有序分割为{紧急,恢复,异常,正常,优化}这 5 种不同的评估集,表征为 $\{C_k, k \in [1,5]\}$ 。

对于各指标项,可以依据技术导则、历史运行资料 and 行业规范等进行各有序分割类分割区间的合理制定,建立 ADN 运行状态态势评估指标的属性区间分类标准矩阵 $Q_f = [a_{jk}, b_{jk}]_{m \times 5}$; 同理,对于各评估样本,为分析其各自属于某种运行状态 C_k 的置信程度,可建立评估样本对运行状态的属性测度区间矩阵 $C_q = [\mu_{ik}, \bar{\mu}_{ik}]_{n \times 5}$, 分别为

$$Q_f = \begin{bmatrix} (a_{11}, b_{11}) & (a_{12}, b_{12}) & \cdots & (a_{15}, b_{15}) \\ (a_{21}, b_{21}) & (a_{22}, b_{22}) & \cdots & (a_{25}, b_{25}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (a_{m1}, b_{m1}) & (a_{m2}, b_{m2}) & \cdots & (a_{m5}, b_{m5}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$C_q = \begin{bmatrix} (\mu_{11}, \bar{\mu}_{11}) & (\mu_{12}, \bar{\mu}_{12}) & \cdots & (\mu_{15}, \bar{\mu}_{15}) \\ (\mu_{21}, \bar{\mu}_{21}) & (\mu_{22}, \bar{\mu}_{22}) & \cdots & (\mu_{25}, \bar{\mu}_{25}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\mu_{n1}, \bar{\mu}_{n1}) & (\mu_{n2}, \bar{\mu}_{n2}) & \cdots & (\mu_{n5}, \bar{\mu}_{n5}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中, a_{jk} 、 b_{jk} 分别为指标项 I_j 在第 k 个属性分割区间的下界和上界值,满足 $a_{jk} \leq b_{jk}$; μ_{ik} 、 $\bar{\mu}_{ik}$ 分别为评估样本 X_i 相对于第 k 种运行状态的属性测度区间的下界和上界属性测度,满足 $\sum_{k=1}^5 \mu_{ik} = 1, \sum_{k=1}^5 \bar{\mu}_{ik} = 1$ 。

4.2 ADN 运行状态态势评估核心流程

基于属性识别理论,实现 ADN 运行状态不同时刻样本数据属性区间态势评估的核心流程如下。

(1) 指标数据的一致化处理。评估模型中各指标项 I_j 的样本数据,其量纲和变化区间各不相同,需首先进行一致化处理,均转化为“极大型”数值:

$$x_{ij}^* = \begin{cases} x_{ij} & \text{极大型数据} \\ x_{j_max} - x_{ij} & \text{极小型数据} \\ \frac{x_{ij} - x_{j_min}}{x_{j_opt} - x_{j_min}} & \text{居中型数据, 且 } x_{j_min} \leq x_{ij} \leq x_{j_opt} \\ \frac{x_{j_max} - x_{ij}}{x_{j_max} - x_{j_opt}} & \text{居中型数据, 且 } x_{j_opt} \leq x_{ij} \leq x_{j_min} \end{cases} \quad (23)$$

式中, x_{ij}^* 为指标实测值经一致化处理后的对应数据, x_{j_min} 、 x_{j_max} 、 x_{j_opt} 分别为指标项 I_j 允许的最小值、最大值和最理想值。

(2) 矩阵规格化处理。为将任意指标项 I_j 对应于任意第 k 种运行状态的隶属度范围统一至 $[0,1]$ 区间,需将其各分割区间对应的下、上标准界值 $[a_{jk}, b_{jk}]$ 进行规格化处理。

分别提取属性区间分类标准矩阵 Q_f 中的各指标项各分割区间对应的下、上界值,构建新的下界标准矩阵 $A = [a_{jk}]_{m \times 5}$ 和上界标准矩阵 $B = [b_{jk}]_{m \times 5}$ 。然后,将最劣级($k=1$, 紧急)和最优级($k=5$, 优化)分割区间中指标项下界标准 a_{j1} 和 a_{j5} 的相对隶属度分别规格化为 $s_{j1} = 0$ 和 $s_{j5} = 1$, 则任意第 k 级分割区间中各指标项的下界、上界标准 a_{jk} 和 b_{jk} 的相对隶属度可用式(24)计算得出,并依此可将下界、上界标准矩阵 $A = [a_{jk}]_{m \times 5}$ 和 $B = [b_{jk}]_{m \times 5}$ 转化为对应的下界、上界标准隶属度矩阵 $\underline{S} = [\underline{s}_{jk}]_{m \times 5}$ 和 $\bar{S} = [\bar{s}_{jk}]_{m \times 5}$ 。进一步,由于指标数据一致化处理中已将所有评价指标进行“极大型”转化,各指标值的下界、上界相对隶属度矩阵 $\underline{Z} = [\underline{z}_{ij}]_{n \times m}$ 和 $\bar{Z} = [\bar{z}_{ij}]_{n \times m}$ 也需由式(25)实现转换计算。

$$\underline{s}_{jk} = \frac{a_{jk} - a_{j1}}{a_{j5} - a_{j1}}, \bar{s}_{jk} = \frac{b_{jk} - b_{j1}}{b_{j5} - b_{j1}} \quad (24)$$

$$\underline{z}_{ij} = \frac{x_{ij} - a_{j1}}{a_{jk} - a_{j1}}, \bar{z}_{ij} = \frac{x_{ij} - b_{j1}}{b_{jk} - b_{j1}} \quad (25)$$

(3) 态势评估指标权重赋值。对于图 2 所示的各评估指标 $I_j (1 \leq j \leq m)$,如本文第 3 节所述,基于最小二乘优化法对其主、客观权重值进行优化组合,并采用遗传算法工具对所构建的最小二乘优化模型进行求解,获得式(20)中所示的最优组合权重向量 $\omega = \{\omega_j, j \in [1,m]\}$ 。

(4) 属性测度区间求取。式(22)中定义的评估样本对运行状态的属性测度区间矩阵 C_q ,其元素值表征的下界、上界属性测度值计算,可通过构建基于双非线性目标加权法的属性测度函数解决^[14]。

定义下界广义加权距离 $\underline{D}_{ik}$ 表征评估样本 X_i 与第 k 个运行状态属性区间的下界分类标准矩阵之间的差异度及其 2 个不同维度的优化约束:

$$\underline{D}_{ik} = \mu_{ik} \sum_{j=1}^m (\omega_j | \underline{z}_{ik} - \underline{s}_{ik} |) \quad (26)$$

$$\min \underline{D} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^5 \mu_{ik} \sum_{j=1}^m (\omega_j | z_{ij} - s_{jk} |) \quad (27)$$

$$\max \underline{H} = \sum_{i=1}^n \left(- \sum_{k=1}^5 \mu_{ik} \cdot \ln \mu_{ik} \right) \quad (28)$$

其中,式(27)旨在使所有待评估样本 X_i 与评估标准之间的加权广义距离之和最小;式(28)旨在使所取 μ_{ik} 的信息熵最大化,以尽量消除随机性和模糊性; $\underline{D}$ 为所有待评估项与评估标准间的加权广义距离之和, $\underline{H}$ 为所有 μ_{ik} 对应的信息熵之和。

将式(26)~(28)所表征的双目标规划问题,采用加权法进一步融合为单目标规划模型:

$$\begin{cases} \min Y(\mu_{ik}) = \underline{D} - \frac{1}{k_H} \underline{H} \\ = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^5 \left\{ \mu_{ik} \sum_{j=1}^m (\omega_j | z_{ij} - s_{jk} |) + \frac{1}{k_H} \mu_{ik} \ln \mu_{ik} \right\} \\ \text{s. t.} \quad \sum_{k=1}^5 \mu_{ik} = 1, 0 \leq \mu_{ik} \leq 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中, $Y(\mu_{ik})$ 为所构建单目标规划模型的属性测度函数值, k_H 常系数一般取为 10。

据此,可求解该模型获得待评估样本 X_i 的下界属性测度 μ_{ik} ; 同理,基于上界标准隶属度矩阵 $\bar{S} = [\bar{s}_{jk}]_{m \times 5}$ 和上界相对隶属度矩阵 $\bar{Z} = [\bar{z}_{ij}]_{n \times m}$, 采用类似方法可得到其上界属性测度 $\bar{\mu}_{ik}$, 分别为

$$\mu_{ik} = \frac{\exp[-k_H \sum_{j=1}^m (\omega_j | z_{ij} - s_{jk} |)]}{\sum_{k=1}^5 \exp[-k_H \sum_{j=1}^m (\omega_j | z_{ij} - s_{jk} |)]} \quad (30)$$

$$\bar{\mu}_{ik} = \frac{\exp[-k_H \sum_{j=1}^m (\omega_j | \bar{z}_{ij} - \bar{s}_{jk} |)]}{\sum_{k=1}^5 \exp[-k_H \sum_{j=1}^m (\omega_j | \bar{z}_{ij} - \bar{s}_{jk} |)]} \quad (31)$$

(5) 综合属性测度求取。求取综合测度的平均值,得到评估样本 X_i 属于第 k 种运行状态的综合属性测度:

$$\mu_{ik} = 0.5(\mu_{ik} + \bar{\mu}_{ik}) \quad (32)$$

式中, μ_{ik} 为 X_i 属于第 k 种运行状态的综合属性测度。

(6) ADN 运行状态等级判定。为避免常用的最大隶属度原则进行模糊评估时可能带来的失真问题,采用级别特征值法,有效利用全部隶属度信息,

进行全部运行状态的属性测度综合表征:

$$R_i = \sum_{k=1}^5 k \cdot \mu_{ik} \quad (33)$$

式中, R_i 为 X_i 对于全部运行状态的属性测度综合表征。

根据专家经验、实践和理论,基于级别特征值对目标 ADN 运行状态进行属性区间划分,如图 3 所示,在属性测度综合表征全域 $[1.0, 5.0]$ 范围内,按 0.8 的区间间隔进行 $k = 1 \sim 5$ 级的运行状态等级划分判定。

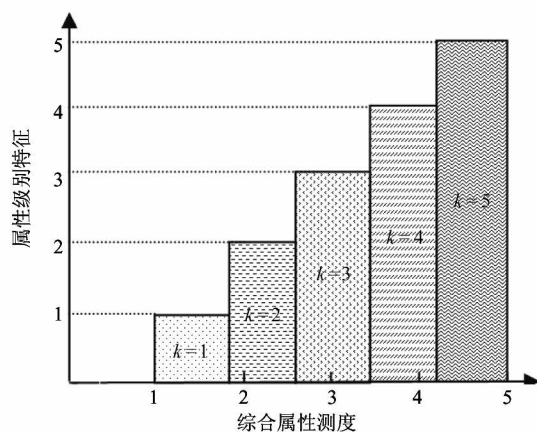


图3 ADN 运行状态进行属性区间划分

5 算例分析

本文基于某实际 10 kV ADN 的运行状态情况进行算例分析。选取该 ADN 一个月内的 8 个不同时段的运行状态进行态势评估(纵向比对),这 8 个时段的负荷具有较典型特征且有所差异。

8 个时段的待评估样本数据依次标记为 $X_1 \sim X_8$, 依据图 2 所示评价指标体系,所选 14 项评估指标项依次标记为 $I_1 \sim I_{14}$ 。各评估样本中指标数据经过一致化处理形成极大型数据,据此可构建评估样本指标矩阵 $X = [x_{ij}]_{8 \times 14}$, 具体数值如表 1 所示。进一步,建立 ADN 运行状态态势评估指标的属性区间分类标准矩阵 $Q_f = [a_{jk}, b_{jk}]_{14 \times 5}$, 具体数值如表 2 所示。

分别采用 AHP 法和变异系数赋权法分析计算获得各评估指标对应的主观权重向量 W_β 和客观权重向量 W_γ , 并进一步基于最小二乘优化法和 Matlab

表 1 一致化处理后各评估样本的评估指标值

评估 指标	评估时段(样本)							
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
I_1	1	1	1	0.97	0.93	0.99	1	1
I_2	1	0.98	1	1	1	1	0.89	0.92
I_3	1	0.65	0.77	0.89	0.66	0.92	0.62	0.66
I_4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.65	0.95
I_5	1	1	0.99	1	0.99	1	0.83	0.99
I_6	1	0.94	0.93	0.95	0.94	0.96	0.91	0.95
I_7	0.85	0.84	0.84	0.84	0.84	0.95	0.84	0.84
I_8	0.93	0.92	0.92	0.95	0.92	0.96	0.94	0.98
I_9	1	0.68	0.65	0.82	0.73	1	0.62	0.82
I_{10}	0.99	0.98	0.97	0.99	0.93	0.92	0.91	0.95
I_{11}	0.99	0.8	0.81	0.93	0.79	0.96	0.78	0.88
I_{12}	0.99	0.93	0.99	0.98	0.85	0.84	0.99	0.92
I_{13}	0.99	0.87	0.99	0.99	0.79	0.86	0.99	0.87
I_{14}	0.99	0.92	0.91	0.90	0.88	0.87	0.89	0.87

表 2 一致化后各评估指标的属性区间分类标准值

评估 指标	运行状态($k=1\sim5$)				
	紧急	恢复	异常	正常	优化
I_1	0-0.78	0.78-0.82	0.82-0.93	0.93-0.98	0.98-1
I_2	0-0.7	0.7-0.8	0.8-0.93	0.93-0.98	0.98-1
I_3	0-0.5	0.5-0.57	0.57-0.75	0.75-0.93	0.93-1
I_4	0-0.8	0.8-0.9	0.9-0.95	0.95-0.999	0.999-1
I_5	0-0.95	0.95-0.98	0.98-0.99	0.99-0.999	0.999-1
I_6	0-0.8	0.8-0.9	0.9-0.95	0.95-0.98	0.98-1
I_7	0-0.7	0.7-0.85	0.85-0.9	0.9-0.95	0.95-1
I_8	0-0.8	0.8-0.9	0.9-0.923	0.923-0.95	0.95-1
I_9	0-0.3	0.3-0.4	0.4-0.6	0.6-0.9	0.9-1
I_{10}	0-0.65	0.65-0.71	0.71-0.85	0.85-0.94	0.94-1
I_{11}	0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.6	0.6-0.72	0.72-1
I_{12}	0-0.3	0.3-0.6	0.6-0.8	0.8-0.9	0.9-1
I_{13}	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5-0.8	0.8-1
I_{14}	0-0.3	0.3-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-1

遗传算法工具求解获得最终的主客观组合权重向量 $\omega = \{\omega_j, j \in [1,14]\}$ 。各评估指标对应的主、客观及综合权重计算值如表 3 所示。

通过规格化计算各项指标分类标准矩阵对应的下界、上界标准相对隶属度矩阵以及下界、上界的相对隶属度,按式(30)、(31),可计算得出各待评估对象的下界、上界属性测度 $\underline{\mu}_{ik}$ 和 $\bar{\mu}_{ik}$; 进一步,按

式(32),可获得其各自的综合属性测度 μ_{ik} 。各待评估对象的下界、上界和综合属性测度计算值如表 4 所示。

依据 ADN 运行状态态势评估流程,通过级别特征值公式计算,最终得到 ADN 安全性、可靠性、优质性、经济性、适应性、网络性 6 个准则层及运行状态目标层的最终态势评估结果,数据如表 5 所示。

表 3 ADN 运行状态评估各指标项权重计算值

一级指标	二级指标	主观权重	客观权重	综合权重
安全性	I_1	0.1622	0.0226	0.0872
	I_2	0.1622	0.0431	0.0754
	I_3	0.1622	0.1848	0.1423
可靠性	I_4	0.1081	0.1029	0.0898
	I_5	0.054	0.0604	0.0616
优质性	I_6	0.0811	0.0315	0.0505
	I_7	0.054	0.0438	0.0571
经济性	I_8	0.0324	0.0242	0.0446
	I_9	0.0324	0.1649	0.1003
适应性	I_{10}	0.054	0.0327	0.0485
	I_{11}	0.0162	0.0961	0.0741
网络性	I_{12}	0.0324	0.0654	0.0531
	I_{13}	0.0324	0.0852	0.0643
	I_{14}	0.0162	0.0424	0.0511

选择评估样本集中具有代表性的 3 个(X_1 :优化; X_3 :异常; X_5 :紧急),采用雷达图形式展示目标 ADN 运行状态的态势评估结果,如图 4 所示。图中,6 个数据轴向分别代表评估模型中的安全性、可靠性、优质性、经济性、适应性、网络性这 6 个准则层评估项,外围线段和内围线段分别对应于评估样本集中所有样本在各准则层项的级别特征最优值和最劣值,中间黑色线段对应于目标样本在各准则层项的实际级别特征值。

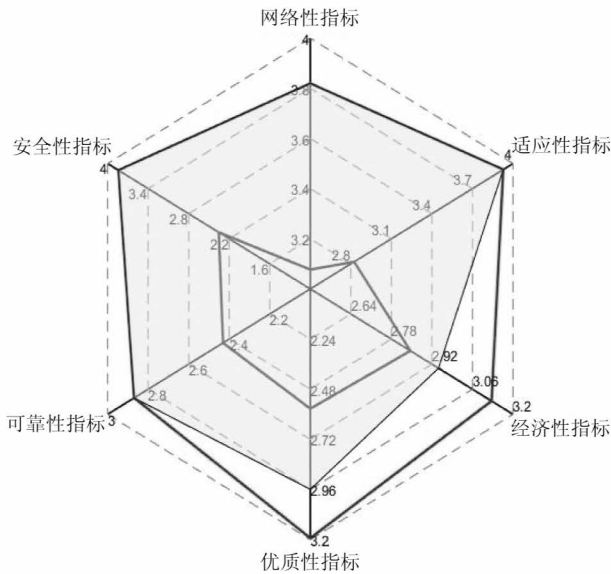
将本算例中 8 个不同时段($T1 \sim T8$)对应的评估样本,依据其运行状态态势评估结果的优劣顺序进行图形化的排列显示,如图 5 所示。图中,横轴表征按优劣顺序排序的评估样本时段从左至右依次为 $\{T1, T4, T6, T3, T2, T8, T7, T5\}$,其各自对应于

表 4 各待评估对象的下界、上界和综合属性测度

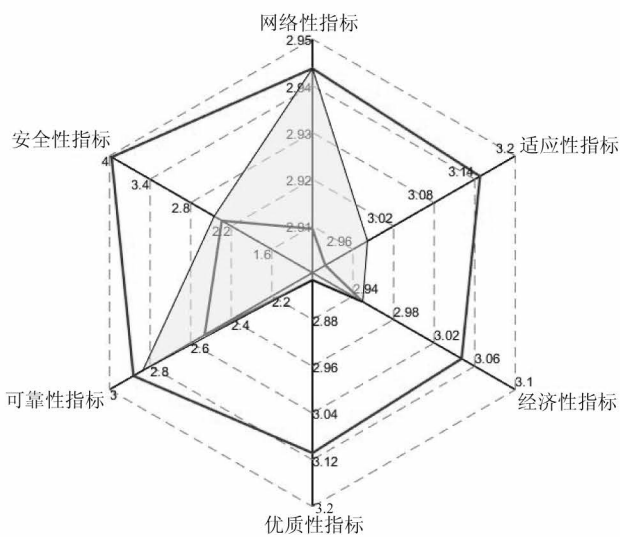
评估 样本	属性测度 类型	属性测度				
		紧急	恢复	异常	正常	优化
X_1	下界	0.0003	0.0114	0.0388	0.1808	0.7688
	上界	0.082	0.0205	0.0776	0.2641	0.6296
	综合	0.0042	0.0159	0.0582	0.2225	0.6992
X_2	下界	0.1735	0.1035	0.1628	0.2058	0.3544
	上界	0.6006	0.2108	0.0874	0.0426	0.0585
	综合	0.387	0.1572	0.1251	0.1242	0.2065
X_3	下界	0.3991	0.078	0.1173	0.1461	0.2595
	上界	0.2866	0.1961	0.1881	0.1357	0.1934
	综合	0.3429	0.137	0.1527	0.1409	0.2265
X_4	下界	0.0019	0.0131	0.0393	0.1801	0.7656
	上界	0.172	0.1818	0.2122	0.1788	0.2552
	综合	0.087	0.0974	0.1257	0.1794	0.5104
X_5	下界	0.678	0.0465	0.0541	0.0732	0.1483
	上界	0.707	0.1988	0.0617	0.0183	0.0142
	综合	0.6925	0.1227	0.0579	0.0457	0.0812
X_6	下界	0.0001	0.0113	0.0341	0.1712	0.7832
	上界	0.2332	0.1892	0.1507	0.1632	0.2636
	综合	0.1167	0.1002	0.0924	0.1672	0.5234
X_7	下界	0.7278	0.0381	0.0533	0.0628	0.118
	上界	0.4747	0.2221	0.1421	0.078	0.0831
	综合	0.6012	0.1301	0.0977	0.0704	0.1005
X_8	下界	0.3413	0.0527	0.0967	0.1675	0.3417
	上界	0.618	0.1997	0.0725	0.0448	0.065
	综合	0.4797	0.1262	0.0846	0.1062	0.2033

表 5 准则层/目标层评估指标计算结果

评估	准则层/目标层						
样本	安全性	可靠性	优质性	经济性	适应性	网络性	综合
X_1	3.840	2.869	2.956	2.943	3.928	3.819	4.596
X_2	2.767	2.811	2.573	2.846	2.965	3.473	2.606
X_3	2.984	2.431	2.573	2.846	2.925	3.799	2.771
X_4	3.388	2.869	2.592	3.065	3.451	3.791	3.929
X_5	2.354	2.811	2.573	2.846	2.948	3.077	1.701
X_6	3.400	2.869	3.192	3.126	3.825	3.133	3.880
X_7	2.382	2.431	2.573	2.986	2.862	3.783	1.939
X_8	2.382	2.437	2.580	3.126	3.320	3.345	2.427

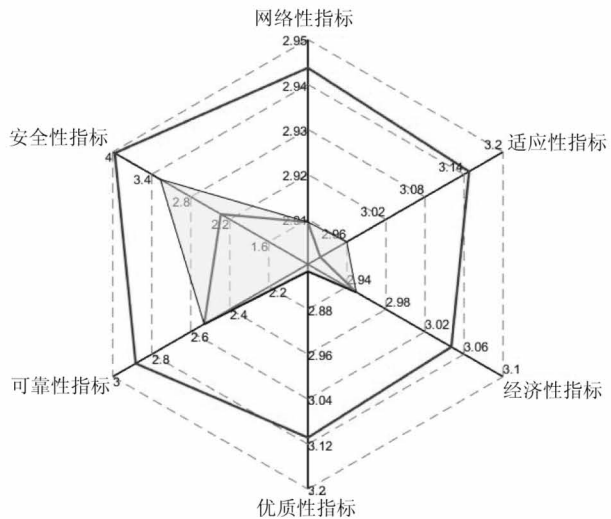


(a) 样本 X_1 (优化)



(c) 样本 X_5 (紧急)

图 4 ADN 运行状态态势评估结果雷达图



(b) 样本 X_3 (异常)

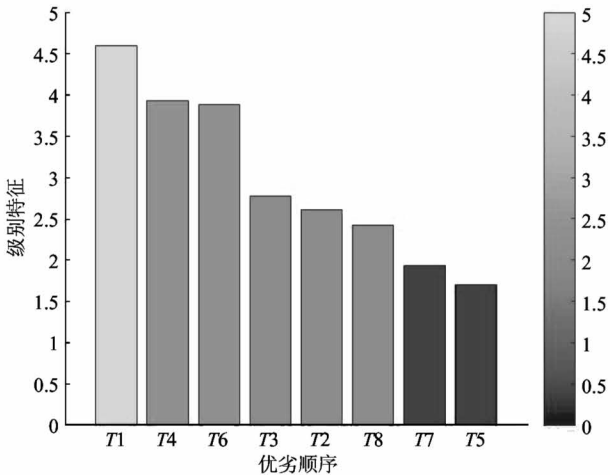


图 5 评估样本态势评估结果优劣排序

纵轴表征的态势评估级别依次为 {5 级, 4 级, 4 级, 3 级, 3 级, 3 级, 2 级, 2 级}。

由图可知,评估样本 X_1 的运行状态处于最佳的“优化”等级;评估样本 X_4 、 X_6 的运行状态同处于次佳的“正常”等级(且 X_4 稍优于 X_6);评估样本 X_3 、 X_2 、 X_8 的运行状态同处于欠佳的“异常”等级(且 X_3 稍优于 X_2 、 X_2 稍优于 X_8),需给与重点关注并争取合理优化;评估样本 X_7 、 X_5 的运行状态同处于不良的“恢复”等级(且 X_7 稍优于 X_5),需尽快设法优化改善。

采用图 2 所示相同的 ADN 运行状态态势评估指标体系,以及表 1 所列的各评估样本分项指标测量数据,分别基于文献[10,11]中的距离综合评价法(方法 1)和模糊层次分析法(方法 2),以及本文所提出的基于组合权重及属性区间法进行同一目标 ADN 相同运行状态样本数据的态势评估效果比对,结果数据如表 6 所示。

表 6 采用 3 种不同方法综合评估结果对比

评估 样本	方法 1	方法 2	本文方法
	最优接近度/ 优劣排序	综合评估值/ 等级	综合评估值/ 等级
X_1	0.0397/1	4.092/4 级	4.596/5 级
X_2	0.0350/5	2.727/3 级	2.606/3 级
X_3	0.0365/4	2.982/3 级	2.771/3 级
X_4	0.0381/3	3.615/4 级	3.929/4 级
X_5	0.0347/7	1.937/2 级	1.701/2 级
X_6	0.0385/2	3.587/4 级	3.880/4 级
X_7	0.0325/8	1.945/2 级	1.939/2 级
X_8	0.0348/6	2.045/2 级	2.427/3 级

对比分析表 6 中 3 种不同方法评估结果,方法 1 依据距离综合评价法计算获得各样本与最优样本的接近度数据,可实现待评估样本 $X_1 \sim X_8$ 的相对优劣排序,但无法给出其各自的具体评估等级;方法 2 和本文所提方法均可获得各评估样本的最终评估等级,且在相同等级内依然可依据其评估值数据实现相对优劣评定。但一方面,从其评价等级结果分布看,方法 2 结果中存在 3 个样本 4 级、2 个样本 3 级、3 个样本 2 级,而本文所提方法结果中存在 1 个样本 5 级、2 个样本 4 级、3 个样本 3 级、2 个样本 2 级,明显具有更好的等级分散性和辨识度。另一方面,从数据特征关联性看,本文所提方法中样本 X_1

仅有 1 个指标值稍欠佳(0.85),其余均为优(最小值达 0.93),综合评估等级理应为 5 级(优化);样本 X_8 仅有 1 个指标值较差(0.66),其余均尚可(最小值达 0.82),与样本 X_7 、 X_5 相比具有明显更好的运行状态特性,但方法 2 中其 3 者评估结果均为 2 级(恢复);与之相比,基于本文所提方法 X_8 评估结果为 3 级(异常),更显合理,且其对样本 X_7 、 X_5 的评估值比方法 2 更低,有效增加了辨识度。经对比分析,本文所构建评估模型及所采用的主客观综合赋权法,能更好地利用样本数据自身蕴含的内在特征,从而提高了综合评估结果的客观性、合理性。

6 结 论

本文针对未来 ADN 新特征及自愈控制等主动控制决策的新需求,提出了基于组合权重及属性区间法的运行状态态势评估方法。通过评估指标体系合理构建以及各指标主客观组合权重的优化求解,然后依照基于属性区间法的态势评估核心流程实现目标 ADN 不同时刻运行状态样本的运行状态辨识评估。算例分析选择 8 个不同时刻样本的评估结果表明,所提基于组合权重及属性区间法的 ADN 运行状态态势评估方法优势如下。

(1)ADN 相对于传统配电网在组成结构、运行特性、控制要求、网络需求等方面均具有显著新特性,本文从安全性、可靠性、优质性、经济性、适应性、网络性这 6 个维度提出共计 14 项细化指标的评估体系,对于 ADN 的运行状态态势评估具有良好的适用性。

(2)针对 14 项评估指标的权重值合理分配问题,本文提出采用最小二乘法构建主、客观组合赋权优化模型,并基于遗传算法工具进行优化求解的方法可对专家学者的理论实践经验和样本数据本身蕴含的特征信息进行充分综合,所得优化组合赋权结果具有合理性。

(3)基于属性区间理论的置信度准则辨识方法,采用级别特征值法可利用全部指标的隶属度信息进行全状态属性区间的测度综合表征,能有效避免模糊评估时可能带来的失真问题,评估结果直观

有效,即可判定各评估样本的状态等级,还可辨识同一状态等级内各评估样本的相对优劣性。

参考文献

[1] 赵波,王财胜,周金辉,等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化,2014, 38(18):125-135

[2] 李振坤,赵向阳,朱兰,等. 智能配电网故障后自愈能力评估[J]. 电网技术,2018, 42(3): 789-796

[3] You H, Vittal Y, Wang Z Y. Self-healing in power quality: an approach using islanding and rate of frequency decline-based load shedding [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(1): 174-181

[4] Hao J, Wang C, Zhao B, et al. A review of active management for distribution networks: current status and future development trends[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2014, 42(3): 280-293

[5] Bie Z H, Zhang P, Li G F, et al. Reliability evaluation of active distribution systems including microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 2342-2350

[6] 刘健,司玉芳. 考虑负荷变化的配电网架安全评估及其应用[J]. 电力系统自动化,2011, 35(23): 70-75

[7] 宗祥瑞,昌冲. 基于熵权法的电网运行状态特征分析与评价[J]. 电力系统及其自动化学报,2016, 28(s): 1-5

[8] 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): 53-60

[9] 汤奕,陈倩,李梦雅,等. 电力信息物理融合系统环境中的网络攻击研究综述[J]. 电力系统自动化,2016, 40(17): 59-69

[10] 刘莲花. 基于距离综合评价法的数学核心期刊评价

[J]. 中国科技期刊研究,2015, 26(8): 871-874

[11] Ma Y, Li Y C, Zhu S Z, et al. Fuzzy AHP-based comprehensive evaluation for smart grid in energy internet systems[J]. *International Journal of Performability Engineering*, 2018, 14(8): 1705-1711

[12] 王一枫,汤伟,刘路登,等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化,2015, 39(8): 141-148

[13] Zhou J, Mu Z X. Research on smart grid risk assessment based on matter-element extenics[J]. *International Journal of Security and Its Applications*, 2016, 10(8): 215-224

[14] 黄建勇,孟琦斌,吴顺超,等. 基于属性数学的配电网运行状态评估[J]. 中国电力,2019,52(2): 104-110

[15] Wang W Y, Lu Z. Cyber security in the smart grid: survey and challenge [J]. *Computer Networks*, 2013, 57(5): 1344-1371

[16] 周磊,吴辉,嵇文路,等. 微电网脆弱性预评估方法[J]. 电力需求侧管理,2018, 20(1): 20-25

[17] 李刚,李建平,孙晓蕾,等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论,2017, 29(12): 17-26

[18] 王立盟,孟浩. 基于熵值和变异系数组合赋权法的生态文明评价体系构建及实证分析[J]. 高技术通讯,2018, 28(4): 372-381

[19] 王长青,张一农,许万里. 运用最小二乘法确定后评估指标权重的方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2010, 28(5): 513-518

[20] 刘国春,费强,赵武云,等. 基于 Matlab 遗传算法优化工具箱的应用[J]. 机械研究与应用,2014(2): 71-73

[21] 李群,宁利. 属性区间识别理论模型研究及其应用[J]. 数学的实践与应用,2002, 32(1): 50-54

Situation evaluation of operating state for active distribution network based on combination weight and attribute interval method

Weng Guoqing, Shu Junpeng, Xie Fangrui, Gong Yangguang, Zhang Youbing
(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

Aiming at the new characteristics of active distribution network (ADN) and its new requirements for self-healing control, a situation evaluation method of operating state in ADN based on combination weight and attribute interval method is proposed. With constructing of the index system for situation evaluation, the analytical hierarchy process (AHP) method and the coefficient of variation method are used to respectively obtain the subjective weight and objective weight of each evaluation index, and the combination weight assignment is further realized based on the least squares optimization method. Then, a situation evaluation method based on the attribute interval theory is proposed for the operating state in ADN. Finally, through the examples of different evaluation samples, the validity, rationality and observability of the proposed situation evaluation method are verified.

Key words: active distribution network (ADN), operating state, situation evaluation, attribute interval method, combination weight