

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.03.008

基于最大离差与系数熵的配网规划评估方法

尹晓敏¹, 王华莹¹, 丁吉², 朱辉¹, 谭兴贵²

(1. 国网聊城供电公司, 山东 聊城 252000; 2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘要:现有配电网规划评估方法中,缺少同时量化专家主观经验与指标客观因素的综合求解模型。分析了配电网规划参与者的利益诉求,搭建了一套较为完整的配电网规划综合评价指标体系。利用最大离差和最大系数熵的组合权重求解方法求解了指标权重值,该方法既考虑了专家对指标的先验知识,又兼顾了组合评价指标对方案的客观影响因素。采用实际配网的规划方案进行评估验证,结果证明了方法的工程实践意义,可以作为配电网规划、扩建工作的参考评价方法。

关键词:配网规划;最大离差;最大熵;综合评估

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)03-0051-09

0 引言

配电网规划的综合效益评估从技术性能、经济效益、环境互动等角度对待规划配电网的属性 and 特点进行定性和定量分析,以确定规划方案的综合工程效益,是配电系统规划节约化、施工建设规范化和运营管理精细化的基础,评估过程包含评价指标体系的搭建以及综合权重求解模型的建立。

在指标体系搭建方面,传统的评价指标体系多从单一角度对配网规划方案的安全运行水平、可靠性、脆弱性、经济效益、污染排放指标等特性的优劣等级进行量化^[1-10]。其中,文献[1]根据主动配电网运行的经济学原理,提出了一种创新的评价指标体系,建立了一种评价主动配电网经济运行的模型。文献[2-7]从不同角度对电网进行了可靠性评估。文献[8-9]分别提出了对配电网节点脆弱度大小排序的方法和基于保护脆弱度加权拓扑模型下的脆弱性评估方法。文献[10]考虑日益增多的电磁、噪声等污染对智能配电网清洁性评估指标进行了研究。但上述文献,均未能统筹考虑规划工程的多方参与者利益需求以及规划方案的综合效益,因此,需要搭建一套完整涵盖配电网建设运营的核心价值和需求的综合效益评价指标体系。

在综合权重求解方法方面,目前主要有主观法、客观法以及结合二者优点的综合赋权法。主观赋权法(如 Delphi 法、层次分析法^[11-12]和最小平方和法^[13-14])的结果依赖于评估者的经验和偏好,该类方法存在理论论据不充分、主观随意性较大等缺

陷。客观赋权法(如熵值法^[15-16]、主成分分析法^[17-18]和多目标最优法)的结果依赖于待评估对象的信息,该类方法缺点在于求解结果与指标的真实权重常常相违背。因此将主观权重与客观权重进行综合优化的优化组合赋权方法随之产生,并已取得了一定成果^[19-23],但目前该类方法仍待完善。

针对上述2个问题,文中首先基于马斯洛需求层次理论,根据规划工作参与者的利益需求层次搭建了包含宏观准则层、指标层和子指标层3个递进层次的综合效益评价指标体系。其次,对影响指标综合求解权重的主客观因素进行了探索,提出了基于最大离差和最大系数熵的综合求解方法,将规划方案的总离差与系数熵归一化后作为联合优化目标反映指标层次之间传递的客观性,定义了权重势比、波动区间等约束条件来描述专家的主观经验。最后对某市部分35 kV配电网进行了综合评估,并与传统层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)进行了比较,表明了所提评估方法的合理性。

1 配网规划的综合效益评估指标体系

对配网规划工作进行评估的目标是建立一套科学、系统、适应、独立和可比的综合指标体系。对配网规划工程的投资效益、安全稳定运行能力、用户供电满意度、高质量持续送电能力、环境互动能力等综合效益进行测度,其本质上是对电力客户、电网运营企业、政府部门等多方参与者利益诉求满足的衡量。根据利益诉求的性质和对诉求的描述,将配网规划的评估分为准则层、指标层和子指标层。

根据配电网规划对电力用户和国家社会的利

收稿日期:2018-12-27;修回日期:2019-02-15

基金项目:教育部春晖计划资助项目(Z2016145);四川省教育厅重大培育项目(18CZ0018)

益需求影响的重要程度,对配网规划的基本需求进行分类,形成评估体系准则层(Z)的5个需求:安全性需求、可靠性需求、经济性需求、适应性需求和环境效益需求。

根据准则层与指标层间的递进特性,构建指标层(A)和子指标层(B),步骤如下:(1)将准则层的每一宏观需求作为配网规划的上层目标;(2)对每一上层目标的实现条件进行分解和归类,形成具有上层目标某一特性的子目标集合,对每一子目标的量化方法进行分析;(3)依据目标集合相似性原则对子目标向上层进行归纳,构建一套科学、系统、相互独立的子指标集。根据上述原则和思路,提炼并构建了配网规划综合效益的评估指标体系,如图1所示。准则层与指标层的具体含义如下:

(1)安全性需求。某一子目标不能达到时,配电网安全稳定运行要求将得不到满足。在预想故障发生时,网络节点的注入功率、电能质量指标可能不满足等式约束和不等式约束,配网从安全运行状态过渡到警戒状态的可能性较大。量化指标为预想故障指标、短路容量比。

(2)可靠性需求。某一子目标不能达到时,可能影响配电系统向用户持续供电的能力,同时还影响实际客户获得的最终供电水平,即电力能源产品的客户体验满意度,量化指标为电网侧可靠性指标、用户侧可靠性指标、可靠性差异指标。

(3)经济性需求。某一子目标不能达到时,会给配网项目的建设工程和运营管理带来成本增加或利润损失的风险,量化指标为建设成本指标、运行成本指标、综合折现值。

(4)适应性需求。反映了当前规划方案所能提供的电力资源对地区负荷增长的适应程度。当某一需求不被满足,将会增加电网的冗余建设和资源浪费,量化指标为电网资源裕度和电网扩展裕度。

(5)环境效益需求。指子目标集不能满足,会导致配网工程的某一环境效益不能达到环境可持续发展的要求,不利于促进清洁能源的规模化利用和建设节能减排、低碳型电网。

2 基于最大离差与最大系数熵的综合评估分析与建模

2.1 符号定义

假设决策问题有 n 个待评估的规划方案,构成集合 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$, m 个评价指标组成指标集 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, 第 i 个评价对象 G_i 对应于第 k 个指标 T_k 的属性值: $y_i(k)$ ($k=1, 2, \dots, m; i=1,$

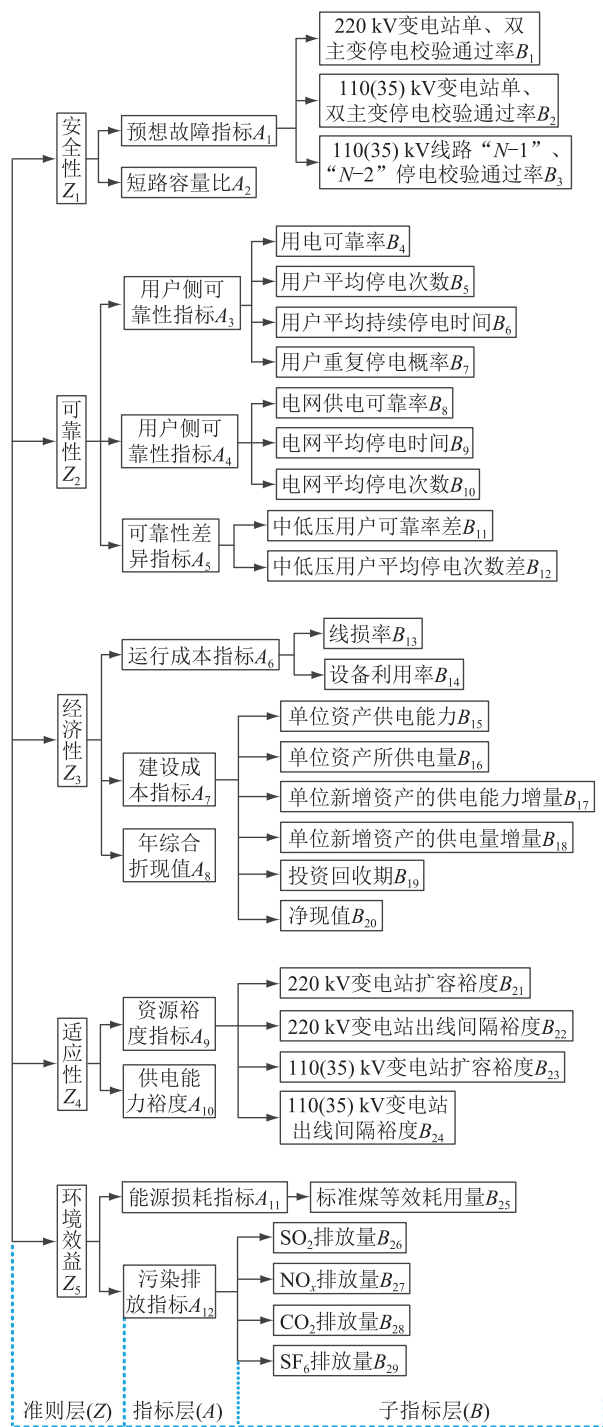


图1 配电网综合效益评估指标体系

Fig.1 Distribution network comprehensive benefit evaluation index system

$2, \dots, n$)。则 G 对 T 的评价矩阵为:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(1) & y_2(1) & \cdots & y_n(1) \\ y_1(2) & y_2(2) & \cdots & y_n(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_1(m) & y_2(m) & \cdots & y_n(m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 指标标准化

文中首先对数据进行离差标准化处理。根据

指标不同属性进行归类,一般情况下分为递增型指标、递减型指标、固定型指标和区间型指标。对于递增型指标采用极大型归一化方式(式(2))、递减型指标采用极小型归一化方式(式(3))、固定型指标采用固定型归一化方式(式(4))、区间型指标采用区间型归一化方式(式(5))。

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min_i y_i(k)}{\max_i y_i(k) - \min_i y_i(k)} \quad (2)$$

$$x_i(k) = \frac{\max_i y_i(k) - y_i(k)}{\max_i y_i(k) - \min_i y_i(k)} \quad (3)$$

$$x_i(k) = 1 - \frac{|y_i(k) - \alpha(k)|}{\max_i |y_i(k) - \alpha(k)|} \quad (4)$$

$$x_i(k) = \begin{cases} 1 - \frac{q_1 - y_i(k)}{H_i(k)} & y_i(k) < q_1 \\ 1 & y_i(k) \in [q_1, q_2] \\ 1 - \frac{y_i(k) - q_2}{H_i(k)} & y_i(k) > q_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \min_i y_i(k) = \min\{y_1(k), y_2(k), \dots, y_n(k)\} \\ \max_i y_i(k) = \max\{y_1(k), y_2(k), \dots, y_n(k)\} \end{cases} \quad (6)$$

$$H_i(k) = \max\{q_1 - \min_i y_i(k), \max_i y_i(k) - q_2\} \quad (7)$$

式中: $x_i(k)$ 为第*i*个评价对象 G_i 对应于指标 T_k 的标准化后属性值; $\alpha(k)$ 为固定型指标 T_k 的最佳属性值; $[q_1, q_2]$ 为区间型指标 T_k 的最优区间。经过标准化处理后得到评价矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \dots & x_n(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \dots & x_n(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_1(m) & x_2(m) & \dots & x_n(m) \end{bmatrix} \quad (8)$$

文中涉及到的所有子指标经标准化后,属于递增型指标有 $B_1—B_4, B_8, B_{14}—B_{18}, B_{20}$;属于递减型指标有 $B_5—B_7, B_9—B_{13}, B_{19}, B_{25}—B_{29}$;属于区间型指标有 $B_{21}—B_{24}$ 。

2.3 指标权重确定

在规划方案的综合效益评估中,由于每个子指标对上层目标的作用、量化关系和影响力不同,需要权衡同层指标之间的相对重要程度,科学地赋予不同的权重。因此,确定各指标的权重,是电网规划评估技术的基础。

文中依据规划方案总离差与信息熵最大化进行指标权重求解。离差可以定量描述评价方案之间的几何距离,即不同规划方案对同一指标计算结

果的差异性,离差最大化可以放大各规划方案评估结果之间的差异性,减少指标之间的冗余性。信息熵是反应下层指标变量传递给上层指标变量的决策信息量的大小,以最大化同层指标的信息熵为目标进行权重系数的优化,可以使得下层指标传递给上层指标的决策信息量最大,且由传递的决策信息量的大小决定指标之间的相对重要程度。基于规划方案离差和信息熵最大化的权重求解思路,既考虑了权重体系对方案决策所起区分作用大小,同时又最大化系统内所有随机变量的信息熵,使得指标权重全局的不确定性减小,传递给上层目标的决策信息更多,目标函数为:

$$\max F_{E-V} = F_{E_{total}} + F_{V_{total}} \quad (9)$$

式中: $F_{E_{total}}, F_{V_{total}}$ 分别为规范化后子层次的总系数熵,总离差。离差 V_T 可以定量描述评价方案之间的几何距离,模型如下:

$$V_T = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n |x_i(k)\omega_k - x_j(k)\omega_k| \quad (10)$$

式中: ω_k 是指标 T_k 的权重系数。

子层次总系数熵模型 E_T :

$$E_T = \sum_{k=1}^m \left\{ - \frac{\sum_{i=1}^n [\omega_k f_i(k) \ln(\omega_k f_i(k))] }{\ln n} \right\} \quad (11)$$

$$f_i(k) = \frac{x_i(k)}{\sum_{i=1}^n x_i(k)} \quad (12)$$

式中: $1/\ln n$ 为与样本数 n 有关的常数,使得 $E_T \in [0, 1]$; $f_i(k)$ 为指标 T_k 对评估方案 G_i 的特征比重。由于目标 E_T, V_T 的量纲不同,所以需要对二者进行归一化:

$$F_{E_{total}} = \frac{E_T - \min E_T(\omega_k)}{\max E_T(\omega_k) - \min E_T(\omega_k)} \quad (13)$$

$$F_{V_{total}} = \frac{V_T - \min V_T(\omega_k)}{\max V_T(\omega_k) - \min V_T(\omega_k)} \quad (14)$$

约束条件 s.t.:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^m \omega_k = 1 & \omega_k \in (0, 1) \\ \lambda_{\alpha, \beta} \in \{0, 1\} & \alpha < \beta; \alpha, \beta \in (1, m) \\ \omega_k \in (T_{k, \min}, T_{k, \max}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\lambda_{\alpha, \beta}$ 为指标 T_α 相对于指标 T_β 的权重势比; $T_{k, \max}, T_{k, \min}$ 为专家推荐的指标 T_k 权重上下限。

2.3.1 客观约束条件

$$\sum_{k=1}^m \omega_k = 1 \quad \omega_k \in (0, 1) \quad (16)$$

表示所有权重的总和为1。

2.3.2 主观约束条件

在实际多属性决策问题中,评价系统本身给出的客观信息只能部分反映出权重信息,某些经验指标需要通过专家的经验才能体现指标的相对重要性次序以及指标权重的实际波动范围,客观数据的大小或者分布特点都不能替代专家的经验知识。结合应用背景,引入主观约束条件减小权重与实际情况的差距。

(1) 权重势比约束。

评估专家基于运行管理经验一般可以对部分指标层提出局部重要程度排序,有助于减小指标权重求解的不确定性。文中引入权重势比的概念,描述专家经验知识中指标的相对重要程度。

设 $\omega_\alpha, \omega_\beta$ 为专家推荐权重向量 \mathbf{W} 中的元素,分别为专家对任意 2 个指标 T_α, T_β 的主观权重, $\lambda_{\alpha,\beta}$ 为 T_α 相对于 T_β 的权重势比,即指标 T_α 相对指标 T_β 的重要程度,表示为:

$$\lambda_{\alpha,\beta} = \begin{cases} 1 & \omega_\alpha/\omega_\beta \geq 1 \\ 0 & \omega_\alpha/\omega_\beta < 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\alpha < \beta, \alpha, \beta \in (1, m)$ 。

采用二元对比法求解专家推荐权重向量 \mathbf{W} , 可以将一个由多指标因素构成的相互制约、相互关联的复杂问题进行降维对比处理,既可以减少专家对多维指标互判的不确定度,同时保证判断矩阵的逻辑一致性。求解过程如下:

步骤一:专家根据比较标度对指标 i, j 进行两两比较赋值,形成判断矩阵 \mathbf{C}_{ij} , c_{ij} 为判断矩阵中的元素,反应指标 T_i 对指标 T_j 的相对重要程度。

$$c_{ij} = z_i/z_j \quad z_i, z_j \in (1, 2, \dots, 10) \quad (18)$$

式中: z_i, z_j 分别为指标 i, j 的相对重要程度标度,取 1~10 整数。

步骤二:求解 \mathbf{C}_{ij} 的最大特征根 λ_{\max} 及专家推荐权重向量 \mathbf{W} 中的元素 $\mathbf{W}_{ij} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_m)$ 。

$$\mathbf{W}_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sum_{j=1}^m c_{ij}} \quad (19)$$

$$\omega_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mathbf{W}_{ij} \quad (20)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m \frac{(\mathbf{C}\omega)_i}{m\omega_i} \quad (21)$$

步骤三:根据式(22)对判断矩阵进行一致性校验,当 $C_R < 0.1$ 时,认为判断矩阵的整体排序逻辑具有一致性,否则返回步骤一调整权重使判断矩阵符合一致性检验。

$$C_R = \frac{C_I}{R_1} = \frac{\lambda_{\max} - m}{(m-1)R_1} \quad (22)$$

式中: C_R 为一致性比率; C_I 为一致性指标; R_1 为平均随机一致性指标; m 代表矩阵的维数。

(2) 指标波动区间约束。

在实际多属性决策问题中,专家运用规划和运行经验,对综合效益评估系统的某些特性指标给出符合实际的期望区间,文中采用专家推荐区间矩阵 $\mathbf{T}_{k,\max,\min}$ 表征专家先验信息中部分指标的波动范围。

$$\mathbf{T}_{k,\max,\min} = \begin{bmatrix} T_{1,\max} & \cdots & T_{k,\max} & \cdots & T_{m,\max} \\ T_{1,\min} & \cdots & T_{k,\min} & \cdots & T_{m,\min} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: $T_{k,\max}, T_{k,\min} \in (0, 1)$, 且 $T_{k,\max} > T_{k,\min}$ 。

由于规划过程的复杂性、评估专家的知识局限性和研究问题的多样性等因素,专家有时不能提供准确的指标取值范围,决策者的判断信息更适合用直觉模糊集而不是确定数或语言变量来表达。因此,文中基于直觉模糊熵理论来求解 $\mathbf{T}_{k,\max,\min}$ 。假设: $\mathbf{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_q, \dots, D_S\}$ 表示受邀的 S 个决策者(专家); \mathbf{B}_F 表示 $\mathbf{T}_{k,\max,\min}$ 的备选方案集,为简化专家评估负担,文中取 $\mathbf{B}_F = \{B_{F1} = 0, B_{F2} = 0.1, \dots, B_{Fg}, \dots, B_{F11} = 1\}$, 求解过程如下:

步骤一:专家 D_q 根据运行和规划的经验在指标 T_k 下对 11 个备选权重上下限范围进行模糊评估,构成直觉模糊决策集 $A_{g,i,k,\max(\min)}^q$:

$$A_{g,i,k,\max(\min)}^q = \{a_{1,i,k,\max(\min)}^q, a_{2,i,k,\max(\min)}^q, \dots, a_{g,i,k,\max(\min)}^q\} \quad (24)$$

$$a_{g,i,k,\max(\min)}^q = \{u_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q), v_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q) \mid \omega_{i,k,\max(\min)}^q \in (0, 1)\} \quad (25)$$

式中: $A_{g,i,k,\max}^q$ (或 $A_{g,i,k,\min}^q$) 为第 g 名专家在第 i 个规划方案的第 k 个指标下对第 g 个备选指标上限(下限)的模糊评估结果。 $u_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q)$, $v_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q)$ 分别为规划方案 i 中指标 T_k 的权重 ω_k 的上限(下限)对于备选方案 A_g 的隶属度和非隶属度。

步骤二:根据专家直觉模糊决策集 A 求解直觉模糊熵:

$$E_{q,k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q) + \frac{\sqrt{2}}{2} [1 - P_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q)] - \frac{\sqrt{2}}{2} |u_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q) - v_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q)| \quad (26)$$

$$P_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q) = 1 - u_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q) - v_A(\omega_{i,k,\max(\min)}^q) \quad (27)$$

式中: $E_{q,k}$ 为专家 D_q 对指标 T_k 的直觉模糊熵; n 为评

价方案总数。 $E_{q,k}$ 反映了专家 D_q 对指标 T_k 给出的决策信息的模糊程度,专家对某一指标的判断信息越不确定,说明专家对其经验知识相对较少,在指标波动范围的求解中给予较小的权系数。

步骤三:依据专家群体决策的结果,求解专家推荐区间矩阵 $T_{k,\max(\min)}$:

$$T_{k,\max(\min)} = \sum_{q=1}^S \left\{ \left[1 - \frac{E_{q,k}}{\sum_{q=1}^S E_{q,k}} \right] \max(A_{k,g}^q) \right\} \quad (28)$$

式中: $\max(A_{k,g}^q)$ 为专家 D_q 对指标 T_k 的上限(下限)的评估结果中隶属度最大的备选值 A_g 。

3 算例分析

基于上述评价指标体系及综合评估方法,文中针对某市部分35 kV及以上配电网的规划方案进行了综合评估。该城市35 kV及以上配电网,以架空为主,且普遍采用多分段多联络方式。所选案例涉及区域处于城市发展中期阶段,对供电可靠性和适应性要求较高。负荷具有以下特点:

(1) 该地区负荷以商办和居住负荷为主,用电负荷较大、负荷密度高、增长速度快,对供电可靠性和供电安全性的要求高,同时还要求电网具有足够的适应性以满足负荷发展的需要。

(2) 负荷分布较均匀。基于以上现状,为了解决负荷增长带来的各种问题,促进资源的优化配置,有效提高能源利用效率和电网供电可靠性。规划部门制定了3个规划方案(G_1-G_3)。文中以这3个规划方案作为研究对象,表1—表5列出了3个规划方案的评估数据。

表1 配网规划方案原始安全性指标数据
Table 1 Distribution network planning scheme original safety indicator data

指标	G_1	G_2	G_3
A_1 $B_1/\%$	99.1	99.75	99.42
$B_2/\%$	99.5	99.01	98.81
$B_3/\%$	98.8	99.77	99.14
A_2 $A_2/\%$	0.01	0.006	0.005 6

3.1 权重势比约束

文中采用专家咨询的方式进行权重势比约束求解,邀请具备丰富规划经验的技术人员来评估各指标的相对重要程度,通过调查得到专家对指标两两重要性的比较系数,形成B层指标相对于A层指标的相对重要性,以及A层指标对准则层Z的相对重要性的原始判断矩阵 C_{ij} 。由式(19)、式(20)、式(21)求解基于二元对比法的专家推荐权重向量 W :

表2 配网规划方案原始可靠性指标数据

Table 2 Distribution network planning scheme original reliability indicator data

指标	G_1	G_2	G_3
A_3 $B_4/\%$	99.1	99.83	99.913
$B_5/\text{次}$	1.17	5.14	1.76
B_6/h	7.32	15.07	7.43
$B_7/\%$	2.1	20.7	5.3
A_4 $B_8/\%$	99.9	99.83	99.917
B_9/h	6.99	14.76	7.24
$B_{10}/\text{次}$	1.58	5.09	1.58
A_5 $B_{11}/\%$	0.06	0.07	0.042
$B_{12}/\text{次}$	0.19	0.05	0.183

表3 配网规划方案原始经济性指标数据

Table 3 Distribution network planning scheme original economic indicator data

指标	G_1	G_2	G_3
A_6 $B_{13}/\%$	7.4	8.2	7.01
$B_{14}/\%$	41.1	52.8	50.7
$B_{15}/[(\text{kV}\cdot\text{A})\cdot\text{万元}^{-1}]$	5.35	2.36	4.18
$B_{16}/[(\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{万元}^{-1}]$	1.86	2.09	1.02
A_7 $B_{17}/[(\text{kV}\cdot\text{A})\cdot\text{万元}^{-1}]$	0.82	1.01	1.47
$B_{18}/[(\text{kW}\cdot\text{h})\cdot\text{万元}^{-1}]$	0.37	0.418	0.699
B_{19}/a	3	2	3
$B_{20}/\text{千万元}$	1.2	0.9	2.6
A_8 $A_8/\text{千万元}$	1.7	2	1.5

表4 配网规划方案原始适应性指标数据

Table 4 Distribution network planning scheme original adaptability indicator data

指标	G_1	G_2	G_3
A_9 $B_{21}/\%$	7.5	2.45	0.74
$B_{22}/\%$	1.65	3.12	8.12
$B_{23}/\%$	10.7	1.36	0.21
$B_{24}/\%$	3.92	7.14	6.66
A_{10} $A_{10}/\%$	3.42	5.46	1.47

表5 配网规划方案原始环境效益指标数据

Table 5 Distribution network planning scheme original environmental benefits indicator data

指标	G_1	G_2	G_3
A_{11} $B_{25}/[\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	306	287	318
$B_{26}/[\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.93	0.61	0.71
A_{12} $B_{27}/[\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	22.2	15.1	17.1
$B_{28}/[\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	1 665	951	1 198
$B_{29}/[\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.42	0.15	0.77

$$\begin{cases}
 W_{\text{target}} = \{0.532, 0.180, 0.054, 0.084, 0.148\} \\
 W_{Z_1} = \{0.614, 2, 0.385, 8\} \\
 W_{Z_2} = \{0.417, 5, 0.332, 8, 0.249, 7\} \\
 W_{Z_3} = \{0.317, 4, 0.322, 5, 0.360, 1\} \\
 W_{Z_4} = \{0.509, 7, 0.490, 3\} \\
 W_{Z_5} = \{0.374, 1, 0.625, 9\} \\
 W_{A_1} = \{0.512, 4, 0.321, 5, 0.166, 1\} \\
 W_{A_3} = \{0.304, 2, 0.278, 4, 0.241, 9, 0.177, 5\} \\
 W_{A_4} = \{0.287, 9, 0.314, 5, 0.397, 6\} \\
 W_{A_5} = \{0.550, 2, 0.449, 8\} \\
 W_{A_6} = \{0.707, 9, 0.292, 1\} \\
 W_{A_7} = \{0.152, 0.117, 0.147, 0.178, 0.201, 0.202\} \\
 W_{A_9} = \{0.310, 4, 0.308, 9, 0.287, 4, 0.093, 3\} \\
 W_{A_{12}} = \{0.127, 0.149, 0.373, 0.351\}
 \end{cases} \quad (29)$$

W 指标权重在对单一指标的绝对重要程度进行量化时主观性较强,但能较为客观地反映同层指标间的相对重要程度。因此,由式(17)可以求得各指标层的权重势比约束 $\lambda_{\alpha,\beta}$,表6 为准则层 Z 的权重势比约束。可以看出,在指标重要程度的意见上,专家认为准则层 Z 中配网安全性水平在综合评估中的重要程度最高,其反映了配电网在故障和检修状态下可持续性供电的要求。而经济性重要程度最低,专家认为在配网计划中可以适当增加建设运行成本来保证较高安全性、可靠性和环境效益。

表6 准则层 Z 权重势比约束

Table 6 Criteria layer Z weight ratio constraint

$\lambda_{\alpha,\beta}$	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅
Z ₁	1	1	1	1	1
Z ₂	0	1	1	1	1
Z ₃	0	0	1	0	0
Z ₄	0	0	1	1	0
Z ₅	0	0	1	1	1

3.2 指标波动地区间约束

在求解 $E_{g,k}$ 时假定评价对象数 $n=1$ 。文中邀请 3 个决策者 $D = \{D_1, D_2, D_3\}$ 对评估体系的 47 个指标权重进行隶属度赋值,构成 141 个直觉模糊决策集 $A_{g,i,k,\max(\min)}$,由式(26)、(27)计算专家对各个指标的直觉模糊熵。图2 给出了准则层 Z 中决策者对的 5 个指标的直觉模糊熵。

在同一指标下对专家的直觉模糊熵进行横向对比,可以发现对指标 Z₁(安全性)、Z₃(经济性)的

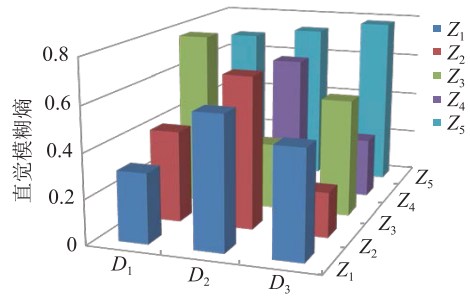


图2 准则层指标直觉模糊熵

Fig.2 Intuitionistic fuzzy entropy

直觉信息较为丰富,决策者 D_3, D_2 相对于决策者 D_1 在安全性的权重取值范围具有更为明确的决策判断,而在经济性上决策者 D_2 的直觉经验相对 D_1, D_3 较低。对指标 Z₂(可靠性)决策者 D_2 的直觉模糊熵较高,而决策者 D_1, D_3 直觉信息都较为模糊,说明决策者 D_2 对可靠性在评估体系中的重要程度具有较为丰富的经验来支撑他的判断。对指标 Z₅(环境效益)3 位决策者具有很高的直觉模糊熵,认为在环境效益的权重范围上,3 位决策者具有较为明确的认知和丰富的经验。依据直觉模糊熵来衡量决策者在某个指标的取值范围决策中的贡献程度,再由式(28)计算各个指标的波动范围 $T_{k,\max,\min}$ (式 30)。

$$\begin{cases}
 T_{\text{target},\max(\min)} = \{(0.4, 0.7), (0.1, 0.5), (0, 0.4), (0, 0.3), (0, 0.2)\} \\
 T_{Z_1,\max(\min)} = \{(0.3, 0.7), (0.4, 0.6)\} \\
 T_{Z_2,\max(\min)} = \{(0.2, 0.6), (0.1, 0.5), (0, 0.3)\} \\
 T_{Z_3,\max(\min)} = \{(0.1, 0.6), (0, 0.5), (0, 0.5)\} \\
 T_{Z_4,\max(\min)} = \{(0.4, 0.7), (0.2, 0.6)\} \\
 T_{Z_5,\max(\min)} = \{(0, 0.6), (0.3, 0.7)\} \\
 T_{A_1,\max(\min)} = \{(0.4, 0.6), (0, 0.4), (0, 0.3)\} \\
 T_{A_3,\max(\min)} = \{(0.1, 0.4), (0.1, 0.4), (0, 0.4), (0, 0.3)\} \\
 T_{A_4,\max(\min)} = \{(0, 0.4), (0, 0.5), (0.1, 0.5)\} \\
 T_{A_5,\max(\min)} = \{(0.4, 0.6), (0.4, 0.6)\} \\
 T_{A_6,\max(\min)} = \{(0.4, 0.8), (0.1, 0.6)\} \\
 T_{A_7,\max(\min)} = \{(0, 0.3), (0, 0.3), (0, 0.3), (0, 0.3), (0, 0.3), (0, 0.3)\} \\
 T_{A_9,\max(\min)} = \{(0.1, 0.5), (0, 0.4), (0, 0.3), (0, 0.1)\} \\
 T_{A_{12},\max(\min)} = \{(0, 0.3), (0, 0.2), (0.1, 0.4), (0, 0.3)\}
 \end{cases} \quad (30)$$

基于最大离差和最大信息熵的综合赋权方法,

由式(9)、式(15)求解各层指标的权重,计算结果如式(31):

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\text{target}} = \{0.415\ 1, 0.255\ 2, 0.038\ 3, 0.121\ 7, 0.169\} \\ \omega_{Z_1} = \{0.592\ 1, 0.407\ 9\} \\ \omega_{Z_2} = \{0.592\ 117\ 0, 0.247\ 7, 0.235\ 3\} \\ \omega_{Z_3} = \{0.208\ 7, 0.363\ 5, 0.427\ 8\} \\ \omega_{Z_4} = \{0.592\ 169\ 14, 0.308\ 6\} \\ \omega_{Z_5} = \{0.354\ 5, 0.645\ 5\} \\ \omega_{A_1} = \{0.497\ 4, 0.321\ 5, 0.240\ 1\} \\ \omega_{A_3} = \{0.331\ 9, 0.240\ 7, 0.219\ 1, 0.208\ 3\} \\ \omega_{A_4} = \{0.293\ 3, 0.307\ 9, 0.398\ 8\} \\ \omega_{A_5} = \{0.508\ 7, 0.491\ 3\} \\ \omega_{A_6} = \{0.610\ 8, 0.389\ 2\} \\ \omega_{A_7} = \{0.119\ 7, 0.053\ 3, 0.091\ 4, 0.162\ 9, \\ \quad 0.281\ 0, 0.291\ 7\} \\ \omega_{A_9} = \{0.471\ 5, 0.299\ 9, 0.147\ 4, 0.081\ 2\} \\ \omega_{A_{12}} = \{0.141\ 2, 0.152\ 2, 0.312\ 5, 0.394\ 1\} \end{array} \right. \quad (31)$$

图3给出了方案 G_1 — G_3 在 Z 层指标中各项指标值与平均水平指标值。综合得分可知,规划方案 G_2 在综合评价结果上以微小的优势高于方案 G_1 ,而二者明显优于方案 G_3 。通过对5个准则层指标的横向对比可得方案 G_2 的综合评价价值最高,主要是由于其安全性、经济性和环境效益领先于其他2个方案,但可靠性远远低于方案 G_1 和方案 G_3 ,且可靠性所占权重仅低于安全性,所以在综合评分中不能很好的拉开与其他方案的差距。方案 G_3 虽然适应性指标居于第一,但它的安全性远低于平均水平,导致其评价价值较低,排序靠后。方案 G_1 虽然综合评分并未处于首位,但可靠性高于方案 G_2 和 G_3 ,安全性和适应性也达到了平均水平,总分仅以极小的差距略微低于方案 G_2 ,考虑到案例涉及到的实际电网对供电可靠性和安全性要求较高,同时还要求电网具有足够的适应性以满足负荷发展的需要,所以方案 G_2 最适合该电网。通过以上结果分析,说明只有考虑电网规划过程中各要素的相互作用,平衡技术与经济、兼顾发展与环境之间的关系,考虑实际电网的需求,才能在整体上取得较好的效益。

为说明所提评估方法的合理性,分别采用传统的AHP、DEA和所提方法对3个规划方案进行综合评估,将3种算法的计算结果进行对比,并计算各方案综合评估分数的方差以及层间传递信息熵,以反映算法对规划方案的区分程度以及指标传递信

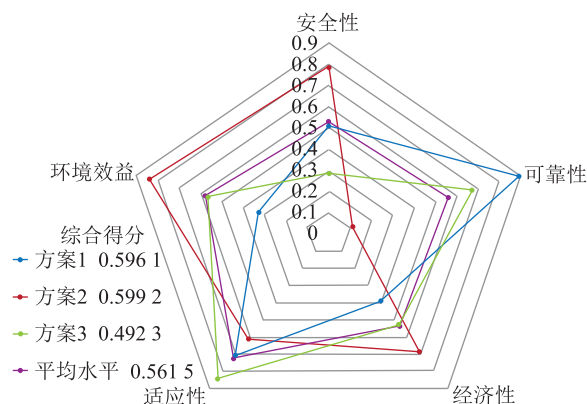


图3 各方案准则层指标评估结果与平均水平对比

Fig.3 Comparison of the results of the evaluation criteria of each program guideline level with the average level

息量,结果如表7所示。

表7 不同方法的结果比较

Table 7 Comparison of results by different methods

规划方案	AHP方法	DEA方法	所提方法
G_1	0.947 0	1.000 0	0.596 1
G_2	0.950 0	1.000 0	0.599 2
G_3	0.945 9	0.999 6	0.492 3
方差	$3.002\ 2 \times 10^{-6}$	3.56×10^{-8}	$2.467\ 962\ 1 \times 10^{-3}$
信息熵	0.577	0.455	0.672

由表7可以看出:DEA方法不能区分方案 G_1 和方案 G_2 ,且DEA方法是从最有利于每个决策单元的角度确定指标权重,忽略了决策者的偏好;AHP方法的排序结果是 $G_2 > G_1 > G_3$,与文中最后排序结果一致,说明所提方法能够兼容评估专家意见,其采用的权重势比约束能够让指标的相对重要程度与AHP法确定的主观意见一致,反映主客观程度和变换趋势的一致性,但AHP法每个方案的方差较小,方案之间区分度不高。另外,从以上3个方法可以看出,最优规划方案是 G_2 ,与实际情况一致。另外,从表中可以看出所提方法的信息熵高于其他2种算法,说明该方法确定的权重能够将更多的决策信息传递给上层指标,表明了所提方法的科学性和实用性。

4 结论

文中提出了一种基于最大离差和最大系数熵的配电网规划综合评价模型。根据配电网规划对电力用户和国家社会利益需求的影响,对配网规划的基本需求进行划分,进而构建出综合评价指标体系。该方法较为全面地提炼了配网规划的利益需求,层次清晰地构造与之对应的指标集。利用二元

对比法求解同层指标之间的权重势比约束,利用专家的直觉模糊熵确定指标的取值范围,得到主观评价的组合约束条件;运用离差最大化和系数熵最大化的原则建立目标函数对权重体系进行求解。算例分析证明了所提方法在配网规划的综合评估中具有参考价值。

本文得到国网山东省电力公司科技项目(2018A-070)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] LI Ye, ZHU Tao, GAO Huifang, et al. Evaluation and sensitivity analysis for economical operation of active distribution network[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(3):715-724.
- [2] 和敬涵,邓晓洋,苗友忠,等.考虑高压配网接线方式的综合电网可靠性评估[J].电网技术,2017,41(4):1204-1211. HE Jinghan, DENG Xiaoyang, MIAO Youzhong, et al. Reliability evaluation of integrated power systems considering connection modes of HV distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(4):1204-1211.
- [3] 李蕊,徐浩,蔡杰,等.计及分块和层级结构融合的配电系统可靠性评估[J].电网技术,2015,39(2):494-499. LI Rui, XU Hao, CAI Jie, et al. Reliability evaluation of distribution system considering partitioning and fusion of hierarchical structure[J]. Power System Technology, 2015(2):494-499.
- [4] 黄嘉健,王昌照,郑文杰,等.基于状态监测的配电网可靠性检修选择模型[J].电网技术,2015,39(1):164-168. HUANG Jiajian, WANG Changzhao, ZHENG Wenjie, et al. Reliability-centered maintenance selection model for distribution network based on condition monitoring[J]. Power System Technology, 2015,39(1):164-168.
- [5] 袁汉杰,李更丰,别朝红.考虑信息物理融合的配电系统可靠性评估[J].智慧电力,2017,45(7):51-57,82. YUAN Hanjie, LI Gengfeng, et al. Distribution system reliability assessment considering cyber-physical integration[J]. Smart Power, 2017,45(7):51-57,82.
- [6] 黄玉雄,李更丰,别朝红,等.分布式综合能源系统可靠性评估[J].智慧电力,2017,45(7):43-50. HUANG Yuxiong, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Reliability evaluation of distributed integrated energy systems[J]. Smart Power, 2017,45(7):43-50.
- [7] 袁修广,黄纯,张磊,等.计及微网孤岛运行方式的配电网可靠性评估[J].电网技术,2015,39(3):690-697. YUAN Xiuguang, HUANG Chun, ZHANG Lei, et al. Reliability evaluation of distribution network considering islanded operation of microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 39(3):690-697.
- [8] 吴辉,彭敏放,张海艳,等.基于复杂网络理论的配电网节点脆弱度评估[J].复杂系统与复杂性科学,2017,14(1):38-45. WU Hui, PENG Minfang, ZHANG Haiyan, et al. Node vulnerability assessment for distribution network based on complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(1):38-45.
- [9] 张海翔,吕飞鹏.基于保护脆弱度加权拓扑模型下的电网脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2014(4):613-619. ZHANG Haixiang, LYU Feipeng. The vulnerability evaluation model of power grid based on the protection-vulnerability-weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(4):613-619.
- [10] 王晓晶,陈星莺,陈楷,等.智能配电网清洁性评估指标研究[J].中国电机工程学报,2013,33(31):43-50. WANG Xiaojing, CHEN Xingying, CHEN Kai, et al. Research on cleaning evaluation indices of smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):43-50.
- [11] 施萱轩,孟军,梁浩,等.配电网故障抢修质量与效率评价体系研究[J].电力工程技术,2018,37(5):143-147. SHI Xuanxuan, MENG Jun, LIANG Hao, et al. Quality and efficiency evaluation system of distribution network fault repair[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):143-147.
- [12] 朱蕾,蒋浩.基于改进主成分分析的低压配电网供电所综合评价方法[J].电力工程技术,2018,37(4):38-44. ZHU Lei, JIANG Hao. Comprehensive evaluation method based on improved principal component analysis of low voltage distribution network power substations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018(4):38-44.
- [13] 胡德秀,郭盼,陈诗怡,等.基于最小截平方和估计的监测数据分析方法[J].数理统计与管理,2017,36(4):632-640. HU Dexiu, GUO Pan, CHEN Shiyi, et al. Analysis method of a water engineering safety monitoring data based on the least trimmed square estimation[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2017, 36(4):632-640.
- [14] 殷春武.加权残差平方和最小的组合预测组合权重的确定[J].统计与决策,2012(6):27-28. YIN Chunwu. Determination of combined prediction weights with the smallest sum of squared weighted residuals[J]. Statistics and Decision, 2012(6):27-28.
- [15] 马纪,刘希喆.基于G2-熵权法的低压配网台区状态特性评估[J].电力自动化设备,2017,37(1):41-46. MA Ji, LIU Xizhe. Conditional characteristic evaluation based on G2-entropy weight method for low-voltage distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):41-46.
- [16] 黄廷城,叶琳浩,张勇军.基于AHP-熵权法的配电网用电可靠性综合评估[J].广东电力,2018,31(1):44-50. HUANG Tingcheng, YE Linhao, ZHANG Yongjun. Comprehensive evaluation on electricity consumption reliability of power distribution network based on AHP-entropy weight method[J]. Guangdong Electric Power, 2018,31(1):44-50.
- [17] 周名煜,谢宁,王承民.基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J].电力系统保护与控制,

- 2017, 45(13):130-137.
- ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13):130-137.
- [18] 李琪, 戚浩金, 胡一嗅. 基于主成分分析和集对分析理论的配电网项目群投资决策[J]. 广东电力, 2017, 30(4):15-20.
- LI Qi, QI Haojin, HU Yichen. Investment decision-making for power distribution network project group based on principal component and set pair analysis [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4):15-20.
- [19] 焦丰顺, 肖健夫, 王若愚, 等. 一种基于组合权重的智能电网综合评估模型应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(11):143-150.
- JIAO Fengshun, XIAO Jianfu, WANG Ruoyu, et al. Application of comprehensive evaluation model to smart grid based on combination weight[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(11):143-150.
- [20] 欧阳健娜, 陈碧云, 李克文. 一种实用的组合系统可靠性评估方法[J]. 广东电力, 2017, 30(1):63-68.
- OUYANG Jianna, CHEN Biyun, LI Kewen. An applied method for reliability evaluation of composite system [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(1):63-68.
- [21] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4):174-182.
- CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):174-182.
- [22] DAI Shuyu, NIU Dongxiao. Comprehensive evaluation of the sustainable development of power grid enterprises based on the model of fuzzy group ideal point method and combination weighting method with improved group order relation method and entropy weight method[J]. Sustainability, 2017, 9:1900.
- [23] 徐长宝, 王玉磊, 赵立进, 等. 基于信息趋势预测和组合赋权的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1):162-168.
- XU Changbao, WANG Yulei, ZHAO Lijin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of intelligent substation relay protection system state based on information trend prediction and combination weighting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):162-168.

作者简介:



尹晓敏

尹晓敏(1971),男,硕士,工程师,从事电力规划、评审工作(E-mail: 573545527@qq.com);

王华莹(1978),女,学士,高级工程师,从事电力规划、评审工作;

丁吉(1993),男,硕士,研究方向为配网规划的评估(E-mail: 1911193308@qq.com)。

Evaluation method of distribution gridplanning based on maximum deviation and coefficient entropy

YIN Xiaomin¹, WANG Huaying¹, DING Ji², ZHU Hui¹, TAN Xinggui²

(1. Liaocheng Power Supply Company, State Grid Shangdong Electric Power Company, Liaocheng 252000, China; 2. College of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The present evaluation index system of distribution network planning cannot quantify both subjective experiences of experts and objective factors. The benefit demands of participants are analyzed and a comprehensive evaluation index system is built. A combination weighting method based on maximum dispersion and maximum coefficient entropy is utilized to obtain the indices weight. The proposed method considers both the prior knowledge of the experts and objective influence factors of indicators. The actual distribution network planning scheme is used for evaluation and verification. The case study indicates the engineering practice of the method. The method provides a reference for the planning and expansion of the distribution network.

Keywords: distribution grid planning; maximum deviation; maximum entropy; comprehensive evaluation

(编辑 杨卫星)