

基于柔性变电站的交直流配电技术经济评估

耿世平^{1,2}, 余敏^{1,2}, 郭晓鹏¹, 牛东晓^{1,2}, 许晓敏¹

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206; 2. 新能源电力与低碳发展研究中心, 北京 102206)

摘要:随着分布式能源、电力电子技术的进步,传统的刚性变电站不再能满足用户的需求,基于柔性变电站的交直流配电技术应运而生,并快速发展。柔性变电站在电网中作为能量传输的节点,可以提升电网安全稳定运行水平。为探究基于柔性变电站的交直流配电技术经济效益,首先综合考虑交直流配电网运行的技术、经济、社会等各方面,构建一套综合评估指标体系,并提出灰色关联聚类分析的指标筛选模型;其次充分考虑决策者的偏好模糊性和客观信息,建立基于模糊层次分析法和熵权法的综合指标赋权模型;然后利用灰色关联改进的 TOPSIS 法,构建交直流配电网综合评估模型;最后设置不同配电网运行情景进行算例分析。算例结果表明:一方面所建立的综合评估模型能够较好地反映评估方案的真实水平;另一方面,考虑风光等分布式电源的基于柔性变电站交直流配电网相比传统配电网有较大的技术经济优势。

关键词:交直流配电网;灰色关联聚类分析;熵权法—模糊层次分析;灰色关联 TOPSIS 法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.017 中图分类号:TM721.3 文章编号:1673-9140(2022)01-0140-11

Technical and economic evaluation of AC and DC distribution based on flexible substation

GENG Shiping^{1,2}, YU Min^{1,2}, GUO Xiaopeng¹, NIU Dongxiao^{1,2}, XU Xiaomin¹

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. New Energy Power and Low Carbon Development Research Center, Beijing 102206, China)

Abstract: With the advancement of distributed energy and power electronics technology, traditional rigid substations can no longer meet the needs of users. AC and DC power distribution technologies based on flexible substations have emerged and developed rapidly. As the node of energy transmission, flexible substations can improve the safe and stable operation level of power grids. In order to explore the technical and economic evaluation of AC/DC distribution power systems considering the flexible substation, this paper considers the technical, economic, and social aspects of AC-DC distribution network operation, through constructing a comprehensive evaluation index system firstly. Then the index selection model is proposed based on the gray correlation clustering for analysis. Secondly, the preference ambiguity and objective information of decision makers are taken into account to establish a comprehensive index weighting model based on the fuzzy analytic hierarchy process and entropy weight method. In addition, the TOPSIS method improved by the gray correlation is utilized to construct a transaction comprehensive evaluation model of DC distribution networks. Finally, different distribution network operation scenarios are considered analysis. It is shown

收稿日期:2020-08-12;修回日期:2021-03-12

基金项目:国家自然科学基金(71804045);中央高校基本科研业务费面上项目(2020MS045)

通信作者:郭晓鹏(1979-),男,博士,副教授,主要从事能源管理、柔性变电站技术研究;E-mail:525279990@qq.com

that the integrated evaluation model established in this paper can better reflect the true level of the evaluation scheme. On the other hand, the AC/DC distribution network involving flexible substations for distributed power sources such as the wind and solar power has greater technical and economic advantages than traditional distribution networks.

Key words: AC and DC distribution network; grey correlation cluster analysis; entropy weight method-fuzzy analytic hierarchy process; grey correlation-TOPSIS

随着社会科学技术的不断进步,人们对于能源的利用水平越来越高,运用能源的方式也逐渐增多,其中电力能源起着重要的作用。在现代社会生活中,直流负荷和变频负荷大量出现,从日常生活中的日光灯、节能灯等照明系统到电视机、路由器等视听设备,甚至近几年新兴的电动汽车以及充电桩等,都采用直流电力能源^[1]。这就使得传统的交流电无法直接投入使用,必须进行电力能源的交直流相互转化。传统的交流电在相互转化的过程中会有一部分电能损耗和热量散发,由此造成能源的不完全利用。而交直流混合供电方式具有更高的可控性以及电能输送效率,对柔性变电站进行研究,符合国家未来配电网的长期发展趋势,有助于提高配电网的电能输送效率,简化变电站设备的种类和数量。同时,为了实现基于柔性变电站的交直流配电网技术的广泛应用与推广,使该项技术能够长期有效地运营以及可持续发展,对其进行技术经济分析以及综合评价具有重要意义^[2-3]。

目前关于传统交、直流配电网综合效益评价研究,国内外学者已经做出了不同程度的调查分析,并有相关文献针对交直流配电网技术经济评价提出了一些有参考价值的评价指标和方法。关于评价指标,文献[4]对直流电源和直流负荷的布点以及交直流配电网网架结构规划设计等方面展开研究,提出了适用于灵活性资源优化调度的实时灵活性供需平衡指标和适用于调度/规划方案整体灵活性评估的灵活性指标;文献[5]根据电压等级序列配置的各项原则和约束条件,通过对其可靠、经济、适应等性能方面进行深度把握,构建了具体的电压等级性能评价指标;文献[6]针对直流配电网规划的特征和 DG 接入带来的不确定性影响,构建了计及网架协调性、DG 配置合理性的综合评价指标体系;文献[7]分析了交直流混合配电网中影响能效的传统因子和新型因子,从中压配电网、配电变压器、低压直流配电网和低压交流配电网 4 个方面构建了交直流混合配

网能效评估指标体系。

对于评价方法,文献[8]提出一种配电网综合评价体系,按照规范性、系统性和可比性原则,利用层次分析法确定评价内容和建立评价体系,并通过应用举例,分析对比不同地区配电网发展情况,验证了该评价方法的可行性和有效性;文献[9]结合直流配电网的特性以及负荷特性,建立了新的基于层次结构的交、直流配电网综合评估指标体系,通过用“5/5-9/1”比例标度矩阵取代“1-9”标度矩阵,大大提高了权重的合理性和不一致判断矩阵的修正速度;文献[10]充分考虑可再生能源出力随机波动性和交直流系统协同调控特性的影响,基于鲁棒优化思想对可再生能源的出力进行描述,采用遗传算法对不同负荷水平下的运行安全性进行判定,为配电网的升级改造提供参考;文献[11]提出一种基于云模型与专家置信度的综合评价方法,从专家权威性和评价协调性出发,确定专家置信度,以此可提高评价过程中的专家可信度,从而得到更加真实可靠的评价结果;文献[12]考虑综合节点故障对系统的影响,构建节点的综合脆弱性指标集,提出综合加权熵和逼近理想排序法(technique for order preference similarity to ideal solution, TOPSIS)的节点脆弱度评估方法。

基于上述研究可知,国内外学者对于交直流配电网系统的评价关注较多,但是目前研究还存在 3 点问题:①大多研究还是针对直流配电网的评价,对于交直流互联配电网方面的评价只有较为片面的可靠性及规范性;②大多研究主要关注初始评价指标体系的构建,但是对于评价指标的有效性和冗余性的验证筛选并未进行深入研究;③现有的配电网评价方法选择大多采用单一主观或者客观评价,一方面忽视了决策者偏好的模糊性和不确定性;另一方面没有充分利用决策中的主客观信息,使得评价结果可靠性不高。

为解决以上目前研究存在的问题,本文做出以

下创新研究。首先,基于交直流配电网技术运行、经济效益、社会效益3个维度建立了交直流配电网的初始评价指标体系,解决先前研究体系片面性的问题;其次,提出用灰色关联度和灰色关联度聚类分析对初始指标体系的评价指标进行分析筛选,得到较为精简有效的交直流配电网评价指标体系,与传统的层次分析法及主成分分析法相比,既减少了指标选取的主观性^[13],又保证指标信息不重复;最后,构建基于模糊层次分析法和熵权法相结合的主客观综合权重确定模型,避免了单一赋权带来的不足,并采用灰色关联改进的理想解法对评价对象进行真实合理的评估,通过算例验证模型的可行性,为之后类似项目进行评价提供了参考依据。

本文的创新性及贡献如下:

1)提出全面精简的交直流配电网的初始评价指标体系,丰富了柔性变电站交直流配电技术综合评价的研究;

2)提出的模糊层次分析法,充分考虑了偏好的模糊性和不确定性,能够提高结果的可靠性,通过指标排序结果确定工程中需要关注的重点;

3)创新性的提出了结合灰色关联聚类分析—主

客观综合赋权法—改进 TOPSIS 的综合评价方法,具有辨识度强的优点。

1 基于灰色关联聚类分析的指标体系

1.1 初始评价指标体系

依据系统性、客观性、科学性、适用性等原则,构建交直流配电网技术经济评价指标体系。传统的交直流配电网综合评价,主要是针对单一直流或者交流配电网的技术运行方面进行评价。但是针对交直流互联配电网方面的评价较少,而且主要集中在可靠性、供电能力等方面,对配电网运行的经济和社会方面评价较少^[14]。鉴于此,本文在传统交直流配电网评价指标体系的基础上,丰富技术运行方面评价,如传输效率、配变及线路运行特性、分布式能源(distributed generator, DG)接纳等,并新增加经济和社会方面的评价指标,如运行成本、投资效率、环境影响、社会影响等。

基于上述分析并结合专家意见,构建的交直流配电网初始技术经济综合评价指标体系如表1所示。

表1 交直流配电网初始技术经济综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of initial technical economy for AC / DC distribution network

目标层	准则层	决策层	目标层	准则层	决策层
技术运行 特性 A ₁	供电可靠性 B ₁	系统平均停电频率 C ₁	经济效益 A ₂	DG 接纳 能力 B ₆	电流谐波畸变率 C ₂₀
		系统平均停电持续时间 C ₂			变压器损耗率 C ₂₁
		平均供电可用率 C ₃			DG 最大准入容量 C ₂₂
		系统期望缺供电量 C ₄			DG 年利用率 C ₂₃
		平均供电半径 C ₅			电压波动指数 C ₂₄
	系统适应性 B ₂	供电半径合格率 C ₆			电压支撑指数 C ₂₅
	传输效率 B ₃	系统灵活性 C ₇		单位负荷电能转化率 C ₂₆	
		系统拓展能力 C ₈		建设投资 C ₂₇	
		换流站损耗 C ₉		运行成本 B ₇	运行维护费用 C ₂₈
		电缆损耗 C ₁₀		损耗费用 C ₂₉	
	线路运行 特性 B ₄	变压器损耗 C ₁₁	故障成本 C ₃₀		
		补偿损耗 C ₁₂	投资效率 B ₈	投资动态回收期 C ₃₁	
		线路负载率 C ₁₃	净现值 C ₃₂		
		实现线路 N-1 通过率 C ₁₄	内部收益率 C ₃₃		
		线路功率因数合格率 C ₁₅	自然环境 影响 B ₉	周边环境影响 C ₃₄	
	配变运行 特性 B ₅	综合线损率 C ₁₆	资源消耗 C ₃₅		
		配变负载率 C ₁₇	节约占地面积 C ₃₆		
		功率因素合格率 C ₁₈	社会环境 影响 B ₁₀	技术示范作用 C ₃₇	
		配变三相负荷不平衡率 C ₁₉	满足未来电力发展 C ₃₈		

1.2 灰色关联聚类分析

对有 n 个指标、 m 个评价对象的评价系统,其指标为

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}) \quad (1)$$

然后根据指标属性确定参考特征指标序列,即基准序列为

$$X_0 = (X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0m}) \quad (2)$$

其中选取指标值越大,性能越好的效益型指标为

$$X_{0i} = \max\{X_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

选取指标值越小性能越好的成本型指标为

$$X_{0j} = \min\{X_{ij}\}, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

选取指标值在某一区间内性能较好的区间型指标取中间值。将转化后的数据矩阵进行标准化处理,变为无量纲的标准矩阵 $\mathbf{X}_{m \cdot n}$,标准化为

$$x_{ij} = \frac{a'_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (a'_{ij})^2}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

计算 X_i 、 X_j 间的关联系数 $\xi_{ij}(k) (i \neq j)$ 为

$$\xi_{ij}(k) = \frac{\min_i \min_k |X_{i(k)} - X_{j(k)}| + \lambda \max_i \max_k |X_{i(k)} - X_{j(k)}|}{|X_{i(k)} - X_{j(k)}| + \lambda \max_i \max_k |X_{i(k)} - X_{j(k)}|} \quad (6)$$

式中 $\min_i \min_k |X_{i(k)} - X_{j(k)}|$ 为指标 X_i 、 X_j 的最小绝对差值; $\max_i \max_k |X_{i(k)} - X_{j(k)}|$ 为指标 X_i 、 X_j 的最大绝对差值; λ 为分辨系数,一般 $[0, 1]$ 之间取值; $j = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, m$ 。

计算得到关联系数后,由于数据角度,信息较为分散不易于比较,因此将各个时刻的关联系数求平均值,将信息集中比较。把指标 X_i 、 X_j 的关联度记为 r_{ij} ,即

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{ij}(k) \quad (7)$$

得到对称的指标关联度矩阵,即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $r_{ii} = 1$, $r_{ij} = r_{ji}$ 。

根据关联度矩阵进行聚类分析,根据实际需求取相应的阈值 r ,将阈值 r ($r > 0.5$)与关联度矩阵进行比较。当 $r_{ij} > r$ 时,则将 X_i 和 X_j 归为一类,最后得出不同的指标类。每类指标都包含评价指标体系的一个方面,所以在筛选指标的时候根据灰色关联度对各类指标的重要程度进行排序,然后挑选出重要的指标,删去其他指标,完成指标的筛选,确定最终指标体系^[15]。

2 指标综合权重求解

本文在对交直流配电方案技术经济评估中,采用主观模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)和客观熵权法相结合的方法计算权重,避免了单一主观或者客观方法得到的权重存在片面与局限性的缺点,弥补单一赋权带来的不足,实现了主客观内在统一,评价结果真实、科学、可信。最后根据最小信息融合原理将 2 种权重进行组合,得到较为真实合理的综合权重。

2.1 模糊层次分析法求解权重

传统的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定指标权重主要由评价人员对于评价因素主观直接判断得到。FAHP 及计算过程 AHP 是 20 世纪 70 年代由美国运筹学 T. L. Saaty 教授提出的一种定性定量相结合的系统分析方法^[16]。FAHP 结合了模糊理论和层次分析法,充分考虑了人进行主观评价的模糊性,避免了面对评价指标量较大时,评价者可能难以保证判断思维的连续与一致性,导致评价结果无法通过一致性检验的结果。由于 FAHP 研究较为成熟,其具体求解过程见参考文献^[17]。

2.2 熵权法求解权重

在使用熵权法确定指标权重的过程中,根据指标所提供的信息量确定每个指标的权重系数,如果该指标所提供的信息量越大,即信息熵越小,所起的

作用就越大,其权重也越高^[18]。其计算过程如下。

首先计算样本的第 j 项指标的熵值,即

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (9)$$

式中 $i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n; k = 1/\ln m$; p_{ij} 为在第 j 项指标下的第 i 中样本的比重,即

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (10)$$

第 j 项指标的熵权为

$$v_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m (1 - e_j)} \quad (11)$$

指标的客观权重向量为

$$\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \quad (12)$$

2.3 综合权重求解

由 FAHP 和熵权法分别得到主、客观权重向量 α, β 。为了使综合权重 ω_i 尽可能同时接近 α_i 和 β_i , 而不偏向其中任意一项, 依据最小信息鉴别原理, 求解出指标的综合权重向量为

$$\begin{cases} \min f(\omega) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \ln \frac{\omega_i}{\alpha_i} + \omega_i \ln \frac{\omega_i}{\beta_i}) \\ \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \end{cases} \quad (13)$$

3 综合评价决策

本文基于灰色关联改进的 TOPSIS 相对贴近度法对各决策方案进行打分评估, 传统的 TOPSIS 法可较好地体现方案数据曲线在位置上的关系, 即依据各评价方案与理想方案距离大小来实现评价方案的排序问题。然而在进行决策分析时, 经常会出现现在保证某个评价方案接近理想解的同时, 无法使其与负理想解最远, 而且传统 TOPSIS 法不能反映方案数据曲线之间的形状相似关系。而利用灰色关联则恰恰可解决数据曲线集合形状的相似性, 二者结合起来构造出一种反映逼近理想解的新尺度, 并

作为判断方案优劣的标准^[19]。基于灰色关联改进的 TOPSIS 法的柔性变电站交直流配电综合评价的步骤如下。

1) 计算正负理想解集。根据权重模型对标准化数据进行加权, 由每列最大元组成的向量称正理想点, 即

$$\begin{cases} \mathbf{u}^+ = (u_1^+, u_2^+, \dots, u_n^+) \\ \mathbf{u}_j^+ = \max\{u_{ij}\}, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (14)$$

由每列最小元组成的向量叫负理想点, 即

$$\begin{cases} \mathbf{u}^- = (u_1^-, u_2^-, \dots, u_n^-) \\ \mathbf{u}_j^- = \min\{u_{ij}\}, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (15)$$

采用欧氏距离计算各待评估方案与正、负理想解的距离分别为

$$d^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^+ - x_{ij})^2} \quad (16)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (u_j^- - x_{ij})^2} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可知, d^+ 越大表明评估方案越优, d^- 则反之。

2) 计算灰色关联矩阵。分别计算各待评估样本与正理想解和负理想解的灰色关联系数矩阵, 即

$$\begin{aligned} (\mathbf{r}_{ij}^+)_{m \cdot n} = & \\ \frac{\min_i \min_k |u^+ - x_{ij}| + \lambda \max_i \max_k |u^+ - x_{ij}|}{|u^+ - x_{ij}| + \lambda \max_i \max_k |u^+ - x_{ij}|} & \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{r}_{ij}^-)_{m \cdot n} = & \\ \frac{\min_i \min_k |u^- - x_{ij}| + \lambda \max_i \max_k |u^- - x_{ij}|}{|u^- - x_{ij}| + \lambda \max_i \max_k |u^- - x_{ij}|} & \end{aligned} \quad (19)$$

式(18)、(19)中 λ 为分辨系数, 一般在 $[0, 1]$ 之间取值, 通常取 0.5, 其作用在于提高关联系数之间的差异显著性。

第 j 个评估方案与正负理想解的灰色关联度分别为

$$r^+ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij}^+ \quad (20)$$

$$r^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij}^- \quad (21)$$

3) 计算各方案的相对接近度。合并灰色关联度和欧氏距离,即

$$s_i^+ = \alpha' \frac{d^-}{d_{\max}^-} + \beta' \frac{r^+}{r_{\max}^+} \quad (22)$$

$$s_i^- = \alpha' \frac{d^+}{d_{\max}^+} + \beta' \frac{r^-}{r_{\max}^-} \quad (23)$$

式(22)、(23)中 α' 、 β' 为偏好系数,分别反映了决策者对评估方案与正负理想方案关联度的偏好程度,并且满足 $\alpha' + \beta' = 1$,决策者可根据自己的偏好确定他们的数值; s_i^+ 反映了待评估方案与正理想解在距离上的接近程度和在形状上的相似程度,其值越大,表明该方案越优, s_i^- 则反之。

计算待评估方案的相对贴进度为

$$C_j = \frac{s_i^+}{s_i^+ + s_i^-}, j = 1, 2, \dots, m \quad (24)$$

该贴进度以欧氏距离和灰色关联度为基础,综合 2 种方法的集合和物理意义,其反映了各方案与正负理想方案之间的位置和数据曲线的相似性差异,按照贴进度的大小对方案进行排序,贴进度越大,方案越优;贴进度越小,方案越劣。

最后一般采用灵敏度来反映评估结果中最优方案与最劣方案之间的差距,灵敏度越大,表明所选用的评估方法区分度越大,评估方法越优,反之较为一般。灵敏度为

$$\eta = \frac{(C_j)_{\max} - (C_j)_{\min}}{(C_j)_{\min}} \times 100\% \quad (25)$$

式中 $(C_j)_{\max}$ 、 $(C_j)_{\min}$ 分别为评价结果中的最优方案与最劣方案的评估值。

4) 综合评价流程。基于以上评价方法与评价指标,本文所建立的交直流混合配电网技术经济综合评价的研究思路为构建交直流配电网综合评价指标体系→基于灰色关联聚类分析进行评价指标筛选→模糊层次分析法与熵权法进行主客观赋权→计算综合权重→基于灰色关联改进的 TOPSIS 评价方法进行方案评价→评价结果分析,具体流程如图 1 所示。

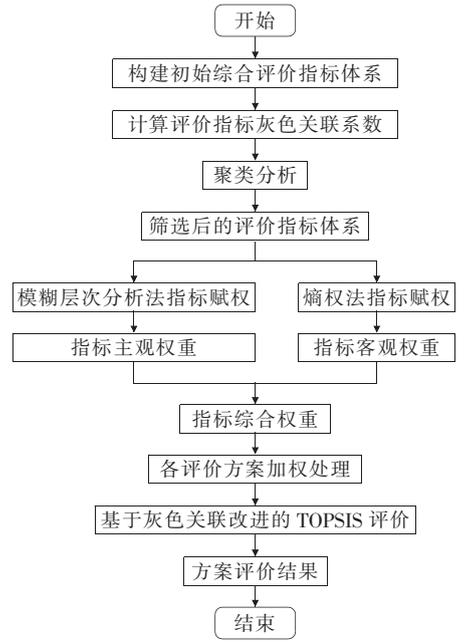


图 1 综合评价流程

Figure 1 Comprehensive evaluation process

4 算例分析

4.1 基础数据

由于缺少直流配电网的实际工程数据,因此本文在参考某地区配电网运行数据的基础上,通过查阅相关资料,结合仿真模拟对该地区配电网进行升级改造,改造成基于柔性变电站的交直流互联配电网,同时考虑风光等分布式电源的影响,对改造前后不同的配电网能效水平进行评估^[20-21]。本文选取 4 种情景下的配电网技术经济参数进行比较评估,分别为情景 1:传统直流配电网;情景 2:传统交流配电网;情景 3:不含风电光伏等分布式电源的交直流互联配电网;情景 4:含风电光伏等分布式电源的基于柔性变电站的交直流互联配电网。

本文设置灰色关联度筛选阈值为 $r = 0.9$,灰色关联偏好系数取 $\lambda = 0.5$,对原始指标体系进行筛选。在评价指标数据的获取中,定性指标采用专家组打分取均值作为该指标的原始数据。不同情景下,配电网评估指标实际参数如表 2 所示。

表 2 指标原始数据
Table 2 Indicator raw data

目标层	准则层	决策层	指标类型	情景			
				1	2	3	4
A ₁	B ₁	C ₁	成本	1.576 9	0.315 2	0.562 8	0.278 5
		C ₂	成本	8.798 0	2.542 2	9.542 5	1.220 5
		C ₃	效益	99.899 6	99.982 4	99.643 1	99.986 1
		C ₄	成本	48.079 2	15.102 9	38.267	9.088 6
	B ₂	C ₅	区间	20.8	16.4	22.3	25.6
		C ₆	效益	99.75	99.87	99.8	99.89
		C ₇	效益	8.45	8.55	8.825	8.975
		C ₈	效益	8.52	8.61	88.88	9.2
	B ₃	C ₉	成本	7.85	5.69	3.87	4.99
		C ₁₀	成本	7.96	6.84	9.85	8.12
		C ₁₁	成本	3.21	4.25	5.41	2.53
		C ₁₂	效益	2.75	4.87	5.64	7.65
	B ₄	C ₁₃	区间	0.56	0.52	0.42	0.39
		C ₁₄	效益	99.85	88.89	99.92	99.95
		C ₁₅	效益	99.74	99.85	99.87	99.89
		C ₁₆	成本	4.18	3.98	3.54	3.31
	B ₅	C ₁₇	区间	0.65	0.74	0.62	0.59
		C ₁₈	效益	99.63	99.72	99.75	99.83
		C ₁₉	成本	3.75	3.2	2.59	2.31
		C ₂₀	成本	4.52	4.24	3.85	3.37
		C ₂₁	成本	5.85	6.14	4.26	4.35
B ₆	C ₂₂	效益	840	1 080	1 000	1 200	
	C ₂₃	效益	24.36	26.86	28.34	27.38	
	C ₂₄	成本	0.421	0.459	0.397	0.643	
	C ₂₅	效益	0.362	0.468	0.553	0.673	
	C ₂₆	效益	69.86	78.56	74.65	85.48	
	C ₂₇	成本	1 062.5	673.5	998.78	1 125.6	
B ₇	C ₂₈	成本	23.24	20.32	21.25	16.89	
	C ₂₉	成本	8.84	7.52	6.87	5.49	
	C ₃₀	成本	15.54	14.25	16.7	18.45	
B ₈	C ₃₁	成本	9.58	8.86	8.05	7.59	
	C ₃₂	效益	163.77	155.37	189.74	205.11	
	C ₃₃	效益	14.81	13.52	14.61	15.01	
B ₉	C ₃₄	成本	8.75	8.98	8.88	8.92	
	C ₃₅	成本	7.65	7.89	8.21	8.34	
B ₁₀	C ₃₆	效益	6.58	7.45	7.89	8.24	
	C ₃₇	效益	7.85	7.98	8.24	8.64	
	C ₃₈	效益	8.12	8.37	8.59	8.94	

4.2 结果分析

首先对上述指标数据进行标准化处理,再根据指标标准化结果,分别按照上面公式,计算得出指标关联度及指标筛选结果、指标赋权结果、基于改进

TOPSIS 法综合评估结果如下。

1) 指标筛选结果。根据式(5)~(9),计算得到不同指标的灰色关联度,将原始评价指标进行重复指标筛选,筛选后的各层级指标如表 3 所示。

表 3 综合权重结果

Table 3 Comprehensive weight results

准则层	决策层	赋权方法			准则层	决策层	赋权方法		
		模糊层次	熵权	综合			模糊层次	熵权	综合
B ₁	C ₁	0.006 1	0.103 5	0.021 1	B ₆	C ₂₂	0.011 0	0.021 6	0.007 9
	C ₂	0.010 3	0.087 3	0.030 0		C ₂₃	0.017 9	0.004 1	0.002 4
	C ₃	0.024 1	0.013 1	0.012 4		C ₂₄	0.028 3	0.040 7	0.038 5
	C ₄	0.003 7	0.097 5	0.072 1		C ₂₅	0.005 1	0.065 6	0.011 3
	C ₅	0.008 8	0.032 6	0.009 6		C ₂₆	0.005 8	0.007 7	0.001 5
B ₂	C ₇	0.023 1	0.000 8	0.002 6	B ₇	C ₂₇	0.136 2	0.044 7	0.203 5
	C ₈	0.005 1	0.001 2	0.000 2		C ₂₈	0.075 0	0.018 6	0.086 7
B ₃	C ₉	0.017 6	0.081 8	0.048 2		C ₃₀	0.041 3	0.011 8	0.016 3
	C ₁₀	0.030 5	0.021 6	0.022 1	C ₃₁	0.151 5	0.010 4	0.052 7	
	C ₁₁	0.051 5	0.086 3	0.048 6	B ₈	C ₃₂	0.050 5	0.035 8	0.125 4
	C ₁₂	0.010 5	0.087 7	0.100 8		C ₃₃	0.050 5	0.009 3	0.015 7
B ₄ 、B ₅	C ₁₄	0.014 7	0.003 3	0.001 6	C ₃₄	0.010 7	0.000 1	0.010 1	
	C ₁₆	0.011 1	0.011 3	0.004 2	B ₉ 、B ₁₀	C ₃₇	0.019 5	0.001 8	0.001 2
	C ₁₈	0.032 2	0.007 4	0.008 9		C ₃₈	0.035 4	0.001 7	0.002 0
	C ₁₉	0.048 2	0.050 4	0.081 2					
	C ₂₀	0.063 8	0.060 9	0.069 7					

2)指标赋权结果。首先计算模糊层次法确定的权重,得到去模糊化的最终权重;其次根据式(9)~(12),利用熵权法计算各指标的信息量和权重,最后计算综合权重结果如表 3 所示。

由表 4 可知,建设投资、净现值、补偿损耗、运行维护费用、系统期望缺供电量等指标的权重较大,分别为 0.203 5、0.123 5、0.100 8、0.086 7、0.072 1,说明对于配电网运行,一方面关注经济效益,另一方面注重运行效率问题,减少损耗和维护费用。由表 4 可知,供电可靠性对于配电网也比较重要,如系统平均停电频率、系统平均停电持续时间、平均供电可用率权重也较高。

4.3 综合评估结果

1)基于灰色关联改进 TOPSIS 评估结果。基于筛选得到的指标体系以及指标权重,根据式(14)~(24),利用灰色关联改进的 TOPSIS 法对 4 种情景下的配电网技术经济效益进行评估,取偏好系数 $\alpha = \beta = 0.5$,得到 4 种情景的相对贴近度结果如表 5 所示。

由表 5 可知,在目前的经济技术水平下,现有的 4 种情景配电网方案中,含风电光伏等分布式电源

的基于柔性变电站的交直流互联配电网技术经济效益最优,传统交流配电网效益次之,而当前的直流配电网效益较低,还存在可以改进的空间。通过情景 3 与情景 4 对比来看,风光等分布式电源对配电网运行有较大的影响,主要表现在基于风电和光伏协同接入配电网中,使得配电网在降损、可靠性和供电能力等指标上有较大的优势。

表 5 相对贴近度结果

Table 5 Relative closeness results

情景	d^+	d^-	r^+	r^-	C_j	评估排序
1	0.094 3	0.006 8	0.830 3	0.982 8	0.321 5	IV
2	0.055 7	0.065 8	0.885 3	0.907 4	0.538 8	II
3	0.071 4	0.032 8	0.859 6	0.920 8	0.436 9	III
4	0.043 8	0.077 3	0.965 7	0.839 5	0.602 7	I

2)情景方案对比。基于表 5 的评估结果,对不同情景下配电网方案的准则层进行评价,计算结果如图 2 所示,图中 1~7 评价方面依次为供电可靠性、系统适应性、传输效率、配变及线路运行特性、运行成本、投资效率、社会与环境影响。雷达图从内至外的指标值依次为 50、60、70、80、90、100。

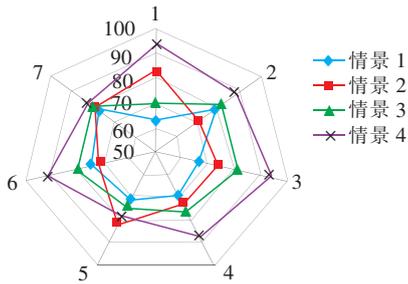


图 2 各情景评估结果

Figure 2 Evaluation results of each scenario

由图 2 可知,在当前的技术水平下,情景 4 在供电可靠性、系统适应性、传输效率、配变和线路运行特性以及投资效率方面,相比其他 3 种情景配电网有较大的优势。情景 3 由于缺少风光等分布式电源的接入,在供电可靠性方面存在劣势。情景 2 相比其他情景评价结果较为适中。情景 1 在供电可靠性,传输效率和运行成本方面评价得分较低,主要原因是一方面现阶段的换流器等电力设备造价成本高,设备故障率大;另一方面,由于现阶段高压配电网和负荷大多是交流形式,直流配电网在传输效率和适应性方面存在一定的不足。

3)不同评估方法对比。为了进一步说明本文所提方法的合理性与灵活性,本文分别采用基于层次分析法、模糊层次分析法、熵权法、综合赋权与传统 TOPSIS 评价方法以及本文所提方法对 4 种情景进行评估,结果如图 3 所示。

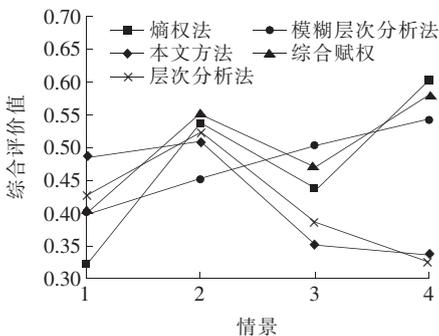


图 3 不同评估方法评估值对比结果

Figure 3 Comparison results of different evaluation methods

由图 3 可知,几种评估方法的直观评估结果,其中层次分析法和模糊层次分析法评价结果值都为情景 2 优于情景 1 优于情景 3 优于情景 4,主要是因为这 2 种方法指标权重受评价者的主观性影响较大,而一般评价者在决策中更加注重评价方案的经

济因素。另外,虽然两者评价结果相同,但模糊层次分析法评估结果的灵敏度为 62.57%,优于层次分析法的 50.14%。此外单独的熵权法评估结果值为情景 4 优于情景 3 优于情景 2 优于情景 1,这是由于纯客观权重法忽略了专家评价意见在决策中的重要性,导致评估结果出现偏差。最后从图 3 中可知,采用综合赋权的传统 TOPSIS 评价方法评估结果与本文所用的基于综合权重改进 TOPSIS 评价方法评估结果一致,通过计算两者评估结果灵敏度,前者为 45.32%,后者为 87.5%,即本文方法有明显优势,辨识度更大,更能体现各方案的优劣。

总体来说,当前阶段该地区 4 种配电网情景下,基于柔性变电站的交直流互联配电网技术经济效益优于交流配电网技术经济效益优于直流配电网技术经济效益。但是需要注意的是,目前配电网技术正在快速发展阶段,除了需要评估当前技术水平下的各情景技术经济效益,还需要对未来电力需求、城市规划等方面做出预测评估。

5 结语

本文为探究新型技术—基于柔性变电站的交直流互联配电网与传统交、直流配电网的技术经济效益评估问题,首先构建了交直流电网技术经济综合评价指标体系,并基于灰色关联聚类分析对初始指标体系进行分析筛选,避免指标评价出现影响不显著与指标信息冗余的问题;然后提出了模糊层次分析法和熵权法主客观综合赋权,使得指标权重更加合理;最后基于灰色关联改进的 TOPSIS 法对 4 种情景下的配电网技术经济效益进行综合评估,主要结论如下。

1)综合考虑配电网运行的技术、经济、社会等方面,构建了包含供电可靠性、系统适应性、传输效率、配变及线路运行特性、运行成本、投资效率、社会与环境影响较为全面的交直流配电网评价指标体系。

2)本文所使用的基于灰色关联聚类分析的指标筛选模型能够有效地提炼关键性指标,降低指标间的重复性。

3)采用模糊层次分析法和熵权法相结合求取指

标的综合权重,不仅考虑了决策者偏好的模糊性,而且充分利用了指标客观信息,用以降低了决策者的主观性,使得最后评价结果更加符合实际情况。

4)根据综合评价结果,含风电光伏等分布式电源的基于柔性变电站的交直流互联配电网在供电可靠性、系统适应性、传输效率、配变和线路运行特性以及投资效率方面相比于传统交、直流配电网有较大的优势,能够创造更大的价值。

参考文献:

- [1] 翁晓春,陈石川,陈大才,等.考虑负荷特性和馈线分段的配电网供电能力评估[J].供用电,2021,38(3):61-65+83.
WENG Xiaochun, CHEN Shichuan, CHEN Dacai, et al. Evaluation of power supply capability of distribution network load characteristics and feeder segmentation [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(3): 61-65+83.
- [2] 李盈含,高亮,陈蒙蒙.柔性直流配电系统控制策略及保护技术研究综述[J].电测与仪表,2020,57(9):8-16.
LI Yinghan, GAO Liang, CHEN Mengmeng. Review on control strategy and protection technology of flexible DC distribution system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(9): 8-16.
- [3] 李长庆,魏云冰,郭元战,等.含分布式电源的配电网电能质量扰动源定位研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):104-111.
LI Changqing, WEI Yunbing, GUO Yuanzhan, et al. Research on power quality disturbance source location of a distribution network with distributed power supply [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 104-111.
- [4] 袁傲,何平,王科丁,等.基于层次分析法的配电网综合评价体系研究[J].电器与能效管理技术,2019(24):75-78.
YUAN Ao, HE Ping, WANG Keding, et al. Research on comprehensive evaluation system of distribution network based on analytic hierarchy process [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(24): 75-78.
- [5] 据泽立,朱跃,蒲路,等.配电网电压综合补偿方法研究[J].高压电器,2020,56(4):235-240.
JU Zeli, ZHU Yao, PU Lu, et al. Study on the voltage integrated compensation method of distribution network [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 235-240.
- [6] 张坤,党东升,马艳霞,等.主动式配电网电源分区布点规划关键技术研究[J].电网与清洁能源,2020,36(3):42-48.
ZHANG Kun, DANG Dongsheng, MA Yanxia, et al. Research on key technologies of power supply distribution zones planning for active distribution network [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(3): 42-48.
- [7] 罗志刚,韦钢,袁洪涛,等.基于区间直觉模糊理论的直流配网规划方案综合决策[J].电工技术学报,2019,34(10):2011-2021.
LUO Zhigang, WEI Gang, YUAN Hongtao, et al. Comprehensive decision making of DC distribution network planning scheme based on interval intuitionistic fuzzy theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2011-2021.
- [8] 赵学良.交直流混合配电网供电能力评估[D].天津:天津大学,2018.
- [9] 尹忠东,冯寅,闫凤琴,等.交直流混合配电网能效综合评价方法[J].电力建设,2016,37(5):100-108.
YIN Zhongdong, FENG Yan, YAN Fengqin, et al. Comprehensive evaluation method for energy efficiency of AC/DC hybrid distribution network [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 100-108.
- [10] 李梦渔.基于改进层次分析法的交、直流配电网综合评估[D].北京:华北电力大学,2015.
- [11] 李小静,刘立舰.基于灰关联度聚类法的交叉口综合质量评价[J].山东交通学院学报,2013,21(1):32-37+41.
LI Xiaojing, LIU Lijian. Comprehensive quality evaluation of intersection based on grey correlation degree clustering method [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2013, 21(1): 32-37+41.
- [12] 任鹏,李翀,陶鹏,等.基于加权熵 TOPSIS 法的电网节点脆弱度评估[J].电力科学与技术学报,2019,34(3):143-149.
REN Peng, LI Chong, TAO Peng, et al. Vulnerability assessment of power grid nodes based on weighted entropy TOPSIS method [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 143-149.
- [13] 李雨馨,张智光.中国林业上市公司绩效评价与优

- 化——基于灰色关联度指标筛选与数据包络分析[J]. 林业经济, 2019, 41(9): 60-66.
- LI Yuxin, ZHANG Zhiguang. Performance evaluation and optimization of China's forestry listed companies based on grey correlation index selection and data envelopment analysis[J]. Forestry Economics, 2019, 41(9): 60-66.
- [14] 刘冠男. 关于配电自动化系统技术经济综合评价体系的建立与应用[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2012.
- [15] 宋瑞丽, 李涛, 苏晓. 区域创新能力的灰色关联度聚类分析研究——以河南省为例[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(19): 9-14.
- SONG Ruili, LI Tao, SU Xiao. Cluster analysis of regional innovation capability based on grey relational analysis—a case study of Henan province[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(19): 9-14.
- [16] 张美霞, 李泰杰, 杨秀, 等. 基于特征优选和加权聚类的商场用电模式分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5): 137-143.
- ZHANG Meixia, LI Qinjie, YANG Xiu, et al. Analysis of electricity consumption pattern in shopping malls based on feature optimization and weighted clustering[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 137-143.
- [17] 何争. 基于FAHP与灰色综合分析法的城市环保评价[J]. 周口师范学院学报, 2019, 36(5): 14-18.
- HE Zheng. Evaluation of urban environmental protection based on FAHP and grey comprehensive analysis method[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2019, 36(5): 14-18.
- [18] 吴昊, 朱自伟. 基于熵权—层次分析法综合指标的电网关键线路辨识[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 39-47+55.
- WU Hao, ZHU Ziwei. Key line identification of power grid based on entropy weight AHP comprehensive index[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 39-47+55.
- [19] 陕振沛, 郭亚丹, 宁宝权, 等. 基于组合赋权灰色关联改进TOPSIS法的应急物流供应商评价[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(8): 71-78.
- SHAN Zhenpei, GUO Yadan, NING Baoquan, et al. Emergency logistics supplier evaluation based on combination weighted grey correlation improved TOPSIS method[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(8): 71-78.
- [20] 黄智达, 石兆麒, 梅勇. 多端柔性直流输电系统动态协调优化控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(2): 45-52.
- HUANG Zhida, SHI Zhaolin, MEI Yong. Dynamic coordinated optimal control strategy for multi terminal flexible HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 45-52.
- [21] 罗志刚, 韦钢, 朱兰, 等. 含分布式电源的城市配电网交直流改造方案综合决策[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 87-97.
- LUO Zhigang, WEI Gang, ZHU Lan, et al. Comprehensive decision of AC/DC transformation scheme for urban distribution network with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 87-97.