

面向高速公路服务区自洽能源系统的 RAMS 评价方法

李艳波¹, 汪静远¹, 陈圆媛², 程绍峰³, 吕浩楠¹, 陈俊硕¹

(1. 长安大学 能源与电气工程学院, 西安 710064; 2. 河南交通投资集团, 郑州 450000; 3. 中国兵器工业集团
航空弹药研究院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 针对如何科学评价高速公路服务区自洽能源系统的弹性和能效这一难题, 本文提出了一种基于传统 RAMS 评价方法的高速公路服务区自洽能源系统的评价方法。首先, 分析了服务区自洽能源系统的结构及特点, 考虑可靠性、可用性、可维修性和安全性 4 个方面的影响因素, 建立了面向服务区自洽能源系统的评价模型, 并设计评价策略。其次, 基于熵权-TOPSIS 法确定各项指标的权重, 基于改进 AHP-VIKOR 法确定系统各项属性的权重, 建立新型多准则综合评价体系。最后, 选取某服务区作为算例进行对比分析, 验证了本文方法在评价自洽能源系统方面的正确性与合理性。

关键词: 交通运输系统工程; 自洽能源系统; 高速服务区; 多准则评价体系; RAMS 评价

中图分类号: U491.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2243-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231056

RAMS assessment approach of self-consistent energy system in highway service areas

LI Yan-bo¹, WANG Jing-yuan¹, Chen Yuan-yuan², CHENG Shao-feng³, LYU Hao-nan¹,
CHEN Jun-shuo¹

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Henan Transportation Investment Group, Zhengzhou 450000, China; 3. Air Ammunition Research Institute, China North Industries Group Corporation (Norinco Group), Harbin 150030, China)

Abstract: The promotion of self-consistent energy systems in highway service areas is a crucial initiative for achieving a dual-carbon strategy. However, the assessment of the resilience and energy efficiency of self-consistent energy systems in service areas remains a pressing challenge. This paper proposes an approach for assessing self-consistent energy systems in highway service areas. We analyzed the structure and characteristics of self-consistent energy systems, considering key indicators such as reliability, availability, maintainability, and safety. Subsequently, we established an assessment model and designed assessment strategies. In addition, the weights of various indicators were determined using the entropy

收稿日期: 2023-10-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB1600202).

作者简介: 李艳波 (1980-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通能源, 微电网. E-mail: ybl@chd.edu.cn

通信作者: 陈俊硕 (1986-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 电力系统分析, 交通能源. E-mail: jsch@chd.edu.cn

weight-TOPSIS method, while the weights of system attributes were determined using an enhanced AHP-VIKOR method. We established a novel multi-criteria comprehensive assessment framework. Through analysis of comparison, the validity and rationality of the method system are verified by computing a self-consistent energy system in a service area as an example.

Key words: engineering of communication and transportation system; self-consistent energy system; highway service area; multi-criteria assessment framework; evaluation of reliability, availability, maintainability, safety

0 引言

近年来,交通运输行业碳排放总量始终占我国碳排放总量的 10% 以上,推进绿色交通发展势在必行。发展高速公路服务区自洽能源系统是推广绿色运输、落实“双碳”战略的重要举措^[1,2]。然而,当前该系统面临着诸多挑战,包括能源利用效率低和电源出力不稳定等问题^[3]。此外,高速公路服务区对可再生能源依赖度逐年提高,而光伏、风电等可再生能源发电的波动性和间歇性,给服务区自洽能源系统带来了高度的不确定性,导致现有的评价方法已无法满足该系统的应用需求^[4]。

目前,众多学者对自洽能源系统的评价已有一定研究。文献[5]分析了分布式能源的特点,构建了包含分布式能源经济、能耗、环境因素的指标体系,提出了主观与客观赋权相结合的 AHP-熵权法,并运用熵值对 AHP 法赋权进行修正,建立了多属性加权决策模型;文献[6]从电力系统韧性出发,比较了不同韧性提升策略的可靠性、安全性、鲁棒性,梳理了电力系统韧性评价指标体系;文献[7]建立了源-网-荷多层关键指标评价体系,以主客观权重偏差平方和最小化为目标,利用 AHP-熵权法确定指标综合权重,结合双碳目标及指标平均水平,构造指标隶属度函数;文献[8]分析了自然灾害中丛簇断层的特征,提出多维度安全风险指数的规范化方法,设计了基于省区协同的风险评价与预防控制系统架构;文献[9]研究了高比例分布式电源接入电网的情况下系统的不确定性,提出可靠性和风险性评价框架,采用随机优化算法,评价与发电机组和经济调度相关的充分性和灵活性问题。然而,目前构建的评价体系主要基于技术可靠性、经济效益、环境效益等单一维度,尚未考虑准则之间可能存在的相互关系和交互作用,也未能实现考虑能源耦合特性“源-网-荷-储”纵向互补自洽能源系统的有效评价。

基于以上分析,本文根据传统 RAMS 评价方

法提出一种综合考虑可靠性、可用性、可维修性、安全性的高速公路服务区自洽能源系统评价方法。结合基于客观评价法(熵权法-TOPSIS法)对服务区全年数据权重进行赋值^[10,11],通过多准则优化决策建立自洽能源系统的多目标决策模型,根据 RAMS 指标值,基于主客观相结合的 AHP-VIKOR 算法对系统各属性进行分析评价^[12-14]。

1 服务区自洽能源系统用电模型

1.1 风电、光伏及负荷功率调节模型

调节风机输出功率时,通过调节风机的电磁转矩,可实现风机快速降/升功率响应^[15]。当需减少输出功率时,通过降低电磁转矩使风机转速升高,吸收部分机械功率,直至风机转速稳定、电磁转矩和机械转矩再次达到平衡,此过程中转动惯量和风力利用系数降低,风机输出功率也迅速降低;当需增加输出功率时,则通过增大电磁转矩使风机转速降低,转动惯量释放的同时风力利用系数变大,风机输出功率迅速增加。发电机的正/负备用容量和风电场的正/负备用容量为:

$$\begin{cases} \Delta P_{w,it}^{\text{up}} = P_{w,it}^{\text{opt}} - P_{w,it} \\ \Delta P_{w,it}^{\text{down}} = P_{w,it} - P_{w,it}^{\text{min}} \\ \Delta P_{w,t}^{\text{up}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{w,it}^{\text{up}} \\ \Delta P_{w,t}^{\text{down}} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{w,it}^{\text{down}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{w,it}^{\text{opt}}$ 为第 i 个风机在最优转速时的最大输出功率; $P_{w,it}$ 为第 i 个风机 t 时刻的输出功率; $P_{w,it}^{\text{min}}$ 为最大转速时风机输出的最小功率; $\Delta P_{w,it}^{\text{up}}$ 、 $\Delta P_{w,it}^{\text{down}}$ 分别为第 i 个风机的正、负备用容量; $\Delta P_{w,t}^{\text{up}}$ 、 $\Delta P_{w,t}^{\text{down}}$ 分别为风电场的正、负备用容量。

为最大化光伏电站发电效率,本文采用基于元启发式算法的改进金枪鱼算法,该策略区别于易陷入局部功率最大点的常规最大功率跟踪(Maximum power point tracking, MPPT)控制策略^[16]。首先通过改进金枪鱼算法追踪全局最优

值,然后采用变步长电导增量算法进行快速寻优。在阴影变化等复杂环境条件下,该方法能以较快的速度摆脱扰动带来的影响,从而有效提升光伏系统输出功率。基于此策略,光伏电站的正/负备用容量为:

$$\begin{cases} \Delta P_{s,t}^{\text{up}} = P_{s,t}^{\text{max}} - P_{s,t} \\ \Delta P_{s,t}^{\text{down}} = P_{s,t} - P_{s,t}^{\text{min}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{s,t}$ 为 t 时刻光伏电站的输出功率; $P_{s,t}^{\text{max}}$ 为 t 时刻光伏电站的最大输出功率; $P_{s,t}^{\text{min}}$ 为 t 时刻光伏电站的最小输出功率; $\Delta P_{s,t}^{\text{up}}$ 、 $\Delta P_{s,t}^{\text{down}}$ 分别为光伏电站的正、负备用容量。

服务区自洽能源系统负荷分为可中断负荷和可削减负荷。对于可中断负荷,通过统计各时段负荷运行状态得到该时段的负荷功率;对于可削减负荷,通过逻辑回归算法对各时段可削减负荷进行聚类,得到该时段的负荷功率。负荷可提升功率和可减少功率的计算公式为:

$$\begin{cases} \Delta P_{L,t}^{\text{up}} = \Delta P_{L,t}^{\text{max}} - \Delta P_{L,t} \\ \Delta P_{L,t}^{\text{down}} = \Delta P_{L,t} - \Delta P_{L,t}^{\text{min}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{L,t}$ 为 t 时刻光伏电站的输出功率; $\Delta P_{L,t}^{\text{max}}$ 为 t 时刻负荷的最大输出功率; $\Delta P_{L,t}^{\text{min}}$ 为 t 时刻负荷的最小输出功率; $\Delta P_{L,t}^{\text{up}}$ 、 $\Delta P_{L,t}^{\text{down}}$ 分别为负荷的可提升功率和可减少功率。

1.2 服务区能源化潜力评价

关于服务区能源化潜力的评价,本文主要通过可再生能源利用率、弃风弃光率和风光互补性 3 个特性从弹性与能效 2 个方面进行衡量^[17]。弃风弃光率用于衡量系统供需失衡的风险,反映产生弃风弃光现象的严重程度;新能源利用率是指系统中新能源输入能量占系统输入总能量的比例,反映系统对可再生能源的消纳水平;新能源出力过程中,为表征风电、光伏出力波动关系,通过计算风光互补性,以确定服务区新能源发电的稳定性。

$$\begin{cases} R_{\text{SEC}} = \sum_{i \in S} p_i \eta_i P_{s,i} \\ R_{\text{WEC}} = \sum_{i \in S} p_i \eta_i P_{w,i} \\ R_{\text{WECR}} = \frac{R_{\text{WEC}}}{R_{\text{WE}}} \times 100\% \\ R_{\text{SECR}} = \frac{R_{\text{SEC}}}{R_{\text{SE}}} \times 100\% \\ R_{\text{RE}} = \frac{Q_{\text{re}}}{Q_{\text{g}} + Q_{\text{re}} + Q_{\text{e}}} \\ \rho_{s,w} = \frac{\text{Cov}(P_{s,t}, P_{w,t})}{\sigma_s \sigma_w} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_{SEC} 、 R_{WEC} 分别为状态 i 下的弃光电量和弃风电量; η_i 为处于 i 状态的时间; p_i 为处于 i 状态的概率; $P_{s,i}$ 为状态 i 对应的弃光电力; R_{SE} 、 R_{WE} 分别为给定时间内的光伏额定发电量和风电额定发电量; R_{RE} 为系统的新能源利用率; Q_{re} 、 Q_{g} 、 Q_{e} 分别为柴油发电机、新能源发电、电网为系统输入的能量; ρ 为 t 时刻自洽能源系统的风光互补性; σ_s 、 σ_w 分别为 $P_{s,i}$ 和 $P_{w,i}$ 标准差。

2 RAMS 评价指标

RAMS 为可靠性 (Reliability)、可用性 (Availability)、可维修性 (Maintainability) 和安全性 (Safety) 首字母的缩写,反映自洽能源系统在规定时间内达到该系统运行规定水平的置信度^[17]。自洽能源系统由供能侧、储能侧和负荷侧组成,其工作状态和经济调度问题可以用弹性和能效来定性和定量评估,而弹性和能效取决于该系统的可靠性、可用性、可维修性以及安全性。

2.1 可靠性

可靠性是系统在给定条件和给定时间区间 (或一定工作量) 内执行要求功能的能力,表征系统各项目满足使用需求的能力,用平均无故障时间衡量,记为 MTBF,计算公式为:

$$\text{MTBF} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} T_i \quad (5)$$

式中: N 为规定时间内故障总数; T_i 为第 i 次故障与第 $i+1$ 次故障之间的时间间隔。

2.2 可用性

自洽能源系统的可用性主要体现为其在寿命周期中的时间调配,用 AV 表示,计算公式为:

$$\text{AV} = \frac{\text{MUT}}{\text{MUT} + \text{MDT}} \quad (6)$$

式中: MUT 为工作周期内的正常工作时间; MDT 为工作周期内的非正常工作时间。

2.3 可维修性

随着电力系统不断复杂化,仅通过维修时间反映系统的可维修性已不够准确、全面。为准确描述系统的可维修性,本文在考虑系统运维测试的基础上,提升了测试性在系统设计及运行阶段的重要性。将维修性指标定义为故障检测率、故障虚警率、平均维修时间和平均维修代价,计算公式为:

$$\begin{cases} \lambda_{FD} = \frac{N_D}{N_T} \\ \lambda_{FA} = \frac{N_{FA}}{N_F + N_{FA}} \\ MTTR = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{n} \\ MCTR = \sum_{i=1}^n \frac{MRC_i + MEC_i}{n} \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ_{FD} 、 λ_{FA} 、MTTR、MCTR 分别为故障检测率、故障虚警率、平均维修时间和平均维修代价; N_T 为规定时间内发生的全部故障数; N_D 为检测出的故障数; N_{FA} 为故障虚警次数; N_F 为真实故障指示次数; t_i 为第 i 次故障的维修时间; MRC_i 为第 i 次故障的维修费用; MEC_i 为第 i 次故障期间所需要的额外费用。

2.4 安全性

平均事故量是平均故障量的子集,反映各项

目出现严重后果的风险,用 H 表示,计算公式为:

$$H = \frac{N_s}{\sum t} \quad (8)$$

式中: N_s 为规定时间内的危险故障总数。

3 用电模型与 RAMS 指标的映射关系

高速公路服务区通过自治能源系统实现服务区能源化, RAMS 指标是衡量系统能否满足使用需求的重要标准。通过分析传统微电网模型与 RAMS 指标体系,发现传统用电模型的指标已经无法准确、全面地衡量自治能源系统的 RAMS 性能。为实现二者结合,本文提出自治能源系统用电模型与 RAMS 指标的映射关系模型,如图 1 所示。

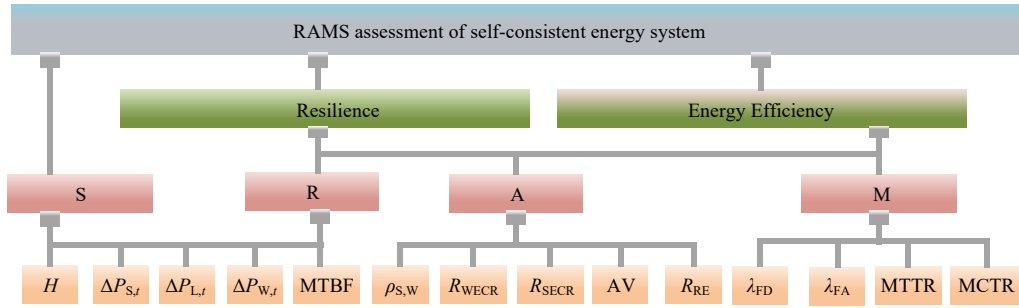


图 1 自治能源系统用电模型与 RAMS 指标映射关系图

Fig. 1 Relationship between electrical model and RAMS indicators

4 评价方法与模型

本文基于 RAMS 实现自治能源系统的多准则决策评价。指标权重的赋值通常有主观、客观和主客观相结合 3 种方法:主观赋权法不需要原始数据,但主观随意性较大;客观赋权法可以准确地反映指标之间的联系,但对原始数据要求较高。熵权法是一种常用的多准则决策方法(客观赋权法),考虑了各准则间的相对重要性,通过计算准则的熵值来衡量其信息量,从而确定各准则的权重。本文在构建决策矩阵 $X_{m \times n}$ 的归一化矩阵 $Y_{m \times n}$ 时,计算公式为:

$$\begin{cases} y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (\text{正向指标}) \\ y_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (\text{负向指标}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\max(x_i)$ 、 $\min(x_i)$ 分别为 m 个方案中第 j 个指标的最大值与最小值; x_{ij} 表示方案 i 的第 j 个指

标; y_{ij} 为标准化指标值。其次,计算第 j 个指标的熵值 E_j 和权重 ω_j ,计算公式为:

$$\begin{cases} E_j = -\frac{\sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij}}{\ln m} \\ \omega_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum E_j} \end{cases} \quad (10)$$

TOPSIS 法考虑了正/负理想解,将备选方案与这两种理想解进行比较,从而准确反映备选方案相较于理想解的优劣程度,提供更具体的评价结果。首先,计算正、负理想解,公式为:

$$S_j^+ = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} & j = 1, 2, \dots, m \text{ (正向指标)} \\ \min_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} & j = 1, 2, \dots, m \text{ (负向指标)} \end{cases} \quad (11)$$

$$S_j^- = \begin{cases} \min_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} & j = 1, 2, \dots, m \text{ (正向指标)} \\ \max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\} & j = 1, 2, \dots, m \text{ (负向指标)} \end{cases} \quad (12)$$

表 1 自洽能源系统属性指标评价得分

Table 1 Assessment scores of self-consistent energy system

月份	H	$\Delta P_{w,t}$	$\Delta P_{s,t}$	$\Delta P_{L,t}$	MTBF	AV	R_{WECR}	R_{SECR}	R_{RE}	$\rho_{s,w}$	MTTR	MCTR	λ_{FD}	λ_{FA}
1月	0.423	0.750	0.500	0.944	0.966	0.438	0.519	0.963	0.667	0.963	0.083	0.936	0.984	0.996
2月	0.577	0.825	0.607	0.833	0.959	0.632	0.556	0.944	0.667	0.963	0.276	0.762	0.985	0.995
3月	0.797	1	0.679	0.556	0.945	0.834	0.611	0.907	0.667	0.963	0.464	0.324	0.984	0.995
4月	0.685	0.850	0.786	0.500	0.944	0.803	0.685	0.815	0.833	0.982	0.536	0.224	0.983	0.992
5月	0.557	0.775	0.857	0.667	0.923	0.663	0.704	0.778	1	1	0.434	0.119	0.982	0.992
6月	0.400	0.675	1	0.944	0.939	0.514	0.741	0.722	1	1	0.596	0.257	0.983	0.992
7月	0.308	0.525	0.857	1	0.947	0.422	0.741	0.759	0.833	0.982	0.568	0.303	0.981	0.990
8月	0.452	0.500	0.821	0.944	0.936	0.406	0.722	0.796	1	1	0.694	0.248	0.981	0.992
9月	0.681	0.525	0.786	0.833	0.944	0.648	0.685	0.889	0.833	0.982	0.749	0.112	0.982	0.993
10月	0.865	0.700	0.571	0.556	0.936	0.782	0.648	0.963	0.833	0.982	0.611	0.245	0.985	0.995
11月	0.692	0.775	0.536	0.722	0.939	0.631	0.556	0.982	0.5	0.944	0.345	0.556	0.986	0.995
12月	0.451	0.800	0.500	1	0.051	0.512	0.500	1	0.5	0.944	0.121	0.908	0.986	0.996

式中: S_j^+ 、 S_j^- 为各方案正、负理想解。其次,通过熵权法得到的权重计算各方案与正负理想解距离和相对贴进度,计算公式为:

$$Sd_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^2 (S_j^+ - x_{ij})^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$Sd_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j^2 (S_j^- - x_{ij})^2} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$\eta_i = \frac{Sd_i^-}{Sd_i^+ + Sd_i^-} \quad (15)$$

式中: Sd_i^+ 、 Sd_i^- 为各方案与正负理想解距离; η_i 为各方案与正理想解的贴进度。

整个系统有 q 项属性时,通过上述算法评估各项属性得到系统总体评价矩阵 C_{iq} 。为实现整个系统的多准则评价,采用基于 AHP- VIKOR 多准则评价的主客观结合方法。AHP 实现从定量分析到定性分析的问题,对一个 $m \times n$ 维的决策矩阵 $A_{m \times n}$ (方案数为 m , 指标数为 n), 建立各级综合评价模型, 构造各指标综合评价矩阵, 得到权重向量。 VIKOR 方法则首先确定正/负理想解, 然后根据计算的各方案的属性评价价值与理想解的距离, 在可接受性和决策过程的稳定条件下对方案进行排序。 VIKOR 方法综合评价指数 L 为:

$$L = W \times (A - C) / (B - C) \quad (16)$$

式中: L 为系统的综合评价指数; W 为 AHP 确定的权重; A 为决策矩阵; B 为正理想解矩阵; C 为负理想解矩阵。

5 算例分析

本文对新疆维吾尔自治区某高速公路服务区自洽能源系统进行有效性验证, 该服务区所处地

区平均月辐射强度为 968.75 MW/m^2 , 平均风速为 7.5 m/s 。服务区占地面积 4.33 hm^2 , 其中建筑面积 $1\,300 \text{ m}^2$, 采光面积约为 90 m^2 , 用电负荷为 910 kW , 其中热负荷为 690 kW 、冷负荷约为 575 kW 。清洁能源发电在服务区能源出力占比及弃风弃光率如图 2、图 3 所示。

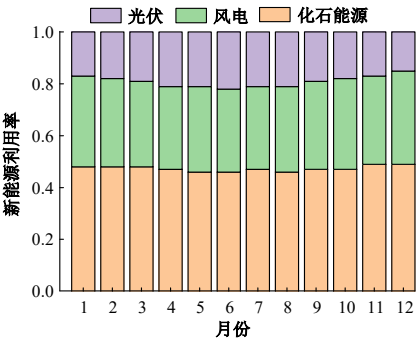


图 2 自洽能源系统能源出力率

Fig. 2 Energy output ratio of self-consistent energy system

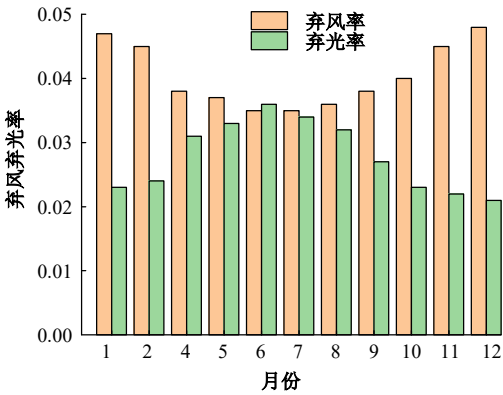


图 3 自洽能源系统弃风弃光率

Fig. 3 Wind and solar power curtailment rate

如图 2 所示,清洁能源占比在 4~9 月相对较高,在 10 月至次年 3 月相对较低。该地区平均月辐射强度 4~9 月为 1 500 MW/m²,10 月至次年 3 月为 475.68 MW/m²,导致光伏发电量有明显的改变。同理,风速也会显著影响风力发电的总量。由图 3 可知,弃风率每年 6 月、7 月较高,12 月、1 月偏低;相反,弃光率在每年 12 月、1 月较低,6 月、7 月较高。

5.1 指标权重赋值

首先,根据熵权法由式(9)(10)得到各准则的客观权重,并采用 TOPSIS 法获得系统各属性的评价得分,如表 1 所示。其次,为评价自洽能源系统全年总体运行情况,根据 AHP 法,通过专家打分得到系统各属性的评价矩阵,如表 2~5 所示,各矩阵的一致性比例 CR<0.1,满足一致性要求,由此建立评价系统各属性的标准评价矩阵 A。由标准评价矩阵 A 中各指标的最大值和最小值,确定各项指标的正理想方案矩阵和负理想方案矩阵。最后,使用 AHP 得到的权重,通过 VIKOR 法得到系统的 RAMS 四项综合评价指数,如图 4 所示。

表 2 可靠性综合评价矩阵

Table 2 Reliability comprehensive evaluation matrix				
	$\Delta P_{w,t}$	$\Delta P_{s,t}$	MTBF	$\Delta P_{L,t}$
$\Delta P_{w,t}$	1	1	3	1/5
$\Delta P_{s,t}$	1	1	3	1/5
MTBF	1/3	1/3	1	1/5
$\Delta P_{L,t}$	5	5	5	1

表 3 可维修性综合评价矩阵

Table 3 Maintainability comprehensive evaluation matrix				
	λ_{FD}	λ_{FA}	MTTR	MCTR
λ_{FD}	1	3	5	5
λ_{FA}	1/3	1	5	5
MTTR	1/5	1/5	1	1
MCTR	1/5	1/5	1	1

表 4 安全性综合评价矩阵

Table 4 Safety comprehensive evaluation matrix				
	$\Delta P_{L,t}$	$\Delta P_{s,t}$	$\Delta P_{w,t}$	H
$\Delta P_{L,t}$	1	3	3	5
$\Delta P_{s,t}$	1/3	1	1	3
$\Delta P_{w,t}$	1/3	1	1	3
H	1/5	1/3	1/3	1

表 5 可用性综合评价矩阵

Table 5 Availability comprehensive evaluation matrix					
	$\Delta P_{s,w}$	AV	R_{WECR}	R_{SECR}	R_{RE}
$\Delta P_{s,w}$	1	7	5	5	3
AV	1/7	1	1/3	1/3	1/5
R_{WECR}	1/5	3	1	1	1/5
R_{SECR}	1/5	3	1	1	1/5
R_{RE}	1/3	5	5	5	1

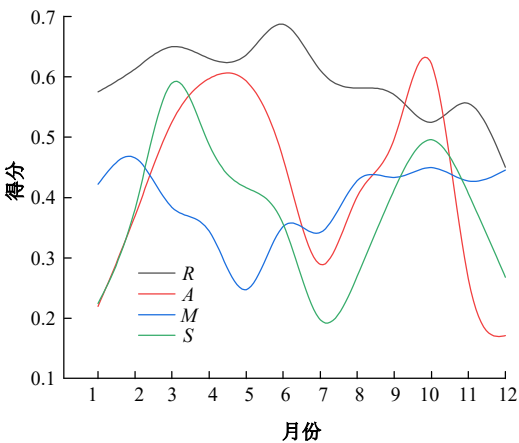


图 4 自洽能源系统 RAMS 评价指数

Fig. 4 RAMS assessment scores of self-consistent energy system

5.2 结果对比

为验证本文方法的可行性与合理性,将本文方法与多准则评价中常用的 AHP 法、TOPSIS 法、熵权法进行对比,结果如表 6 所示。

表 6 不同评价方法的计算结果比较

Table 6 Comparison of results from different methods				
方法	R	A	M	S
本文方法	0.565 47	0.417 93	0.395 04	0.375 48
AHP	0.807 84	0.775 65	0.525 92	0.652 53
TOPSIS 法	0.637 01	0.530 91	0.487 693	0.487 69
熵权法	0.25	0.20	0.25	0.25

由表 6 可知,本文方法的结果一致方案优劣顺序为 R、A、M、S,AHP 法、TOPSIS 法优劣顺序均为 R、A、S、M,熵权法所得结果为 R、A、S 属性得分相同,M 得分偏低。然而,TOPSIS 法确定的 M 与 S 评价值差异较小;而熵权法确定的结果缺乏严格一致性,难以准确反映实际差异。

AHP 法通过专家打分得到评价矩阵,并基于矩阵与数据的乘积计算评价值。然而,该方法未考虑各指标之间可能存在相关性,高度依赖于决策者的主观判断,主观性较强。由表 6 可知,通过

TOPSIS方法得到的结果中, M 为0.487 693、 S 为0.487 69,其差异很小,这是因为TOPSIS方法缺乏内置一致性检验机制,无法检测和修正决策者在比较和权重分配过程中的偏差,导致结果的局限性。而通过熵权法得到的结果中, R 、 S 结果都是0.25。由式(8)可知,平均事故量是平均故障量的子集,因此,表6中通过得到熵权法得到的结果明显与实际值有偏差。这是因为熵权法只通过信息熵来确定权重,未考虑主观因素和专家判断。而对于某些决策问题,主观因素可能对权重的确定具有重要影响,这是熵权法所无法考虑的。

本文结合服务区自洽能源系统模型指标与RAMS指标,在评价系统各属性时,通过熵权-TOPSIS法确定各指标权重及得分:先通过熵权法使用数据的统计性质计算权重,减少主观偏差的影响;而后使用TOPSIS法通过比较各个方案与正理想解和负理想解之间的距离,确定最优解和次优解,从而得到系统各功能侧的得分。系统总体评价通过AHP确定RAMS各指标综合评价矩阵初步确定功能区指标权重,通过VIKOR法考虑了不确定性对决策结果的影响,改进权重避免了决策者的主观影响。综上,本文方法规避了上述方法的缺点,具有较强的可行性与合理性。

6 结 论

(1)基于熵权-TOPSIS法对系统各功能侧不同属性的各项指标进行处理,根据不同功能侧的职能特点,通过调整群体效用权重系数得到最优解,分析数据信息熵和各指标的最优解,得到不同功能侧的整体评价结果。

(2)得到各功能区的相应属性评价得分后,采用基于AHP-VIKOR法的主客观评价结合,方法通过专家打分以及调整权重实现自洽能源系统的整体综合评价。

(3)本文提出的评价方法实现了服务区自洽能源系统的综合评价,兼顾“源-储-荷”特点进行针对性评估,可为面向高速公路服务区的综合能源系统设计提供参考依据。

(4)高速公路服务区运行过程中,可依据评价结果优化相应配置,实现服务区自洽能源系统的弹性与能效的最优平衡。

参考文献:

- [1] 刘洋,刘吉成.基于大数据与粒子群的清洁能源协同优化调度方法[J].吉林大学学报:工学版,2023,53(5):1443-1448.
Liu Yang, Liu Ji-cheng. Collaborative optimization scheduling method of clean energy based on big data and particle swarm optimization [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(5): 1443-1448.
- [2] Xiong Y Q, Cheng Q. Effects of new energy vehicle adoption on provincial energy efficiency in China: From the perspective of regional imbalances[J]. Energy, 2023, 281: No. 128324.
- [3] 任建强,王璐阳,吴家浩,等.基于情景构建与推演的新能源电力设备运行风险评估[J].清华大学学报:自然科学版,2022,62(10):1571-1578.
Ren Jian-qiang, Wang Lu-yang, Wu Jia-hao, et al. Operating risk assessments of new energy power equipment based on scenario construction and deduction[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(10): 1571-1578.
- [4] 马静,黄韦博,聂珍存,等.基于新能源快速调节的孤岛微网弹性恢复策略[J].电网技术,2024,48(3):1103-1115.
Ma Jing, Huang Wei-bo, Nie Zhen-cun, et al. Elastic recovery strategy of island micro-network based on rapid adjustment of new energy[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1103-1115.
- [5] 王振刚,陈渊睿,曾军.面向完全分布式控制的微电网信息物理系统建模与可靠性评估[J].电网技术,2019,43(7):2413-2421.
Wang Zhen-gang, Chen Yuan-rui, Zeng Jun. Modeling and reliability assessment of completely distributed microgrid cyber physical system[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2413-2421.
- [6] 郭伟,安佳坤,贺春光,等.计及冰灾影响的电力系统韧性评估与提升方法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(8):116-122.
Guo Wei, An Jia-kun, He Chun-guang, et al. Resilience assessment and improvement method for power system considering the influences of ice disaster[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 116-122.
- [7] 李响,牛赛.双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J].中国电机工程学报,2021,41(增刊1):178-184.
Li Xiang, Niu Sai. Study on multi-layer evaluation

- system of source-grid-load under carbon-neutral goal[J]. Proceeding of the CSEE, 2021, 41(Sup. 1): 178-184.
- [8] Chang K, Yu C, Liu S, et al. Design and application of power grid security risk assessment and hierarchical control system in natural disasters[C]//International Conference on Power System Technology(POWERCON), Shenyang, China, 2021: 2080-2086.
- [9] Stover O, Karve P, Mahadevan S. Reliability and risk metrics to assess operational adequacy and flexibility of power grids[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 231: No. 109018.
- [10] Chen P. Effects of the entropy weight on TOPSIS[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 168: No. 114186.
- [11] Gupta C, Gupta V. Requirements risk estimation Using TOPSIS method[C]//The 27th Asia-Pacific Software Engineering Conference(APSEC), Singapore, 2020: 505-506.
- [12] Mo L. New energy industry investment risk assessment method based on fuzzy AHP[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2023, 45(4, 5): 436-447.
- [13] Hashemi A, Dowlatshahi M B, Nezamabadi-pour H. VMFS: A VIKOR-based multi-target feature selection[J]. Expert Systems with Application, 2021, 182: No. 115224.
- [14] Khan M J, Kumam P, Kumam W. Theoretical justifications for the empirically successful VIKOR approach to multi-criteria decision making[J]. Soft Computing, 2021, 25(12): 7761-7767.
- [15] 史卓鹏, 黄韦博, 李勇, 等. 基于转动惯量存储与释放的风电场快速功率调控策略[J]. 华北电力大学学报:自然科学版, 2024, 51(4): 35-48.
- Shi Zhuo-peng, Huang Wei-bo, Li Yong, et al. Wind farm rapid active power control strategy based on moment of inertia storage and release[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2024, 51(4): 35-48.
- [16] 李艳波, 李林宜, 刘维宇, 等. 基于TSO-MSMA算法在光伏系统MPPT中的研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 324-330.
- Li Yan-bo, Li Lin-yi, Liu Wei-yu, et al. Research on TSO-MSMA algorithm in MPPT of photovoltaic systems[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2023, 44(8): 324-330.
- [17] 马苗苗, 邵黎阳, 刘向杰. 分布式预测控制在微电网协调控制中的应用[J]. 吉林大学学报:工学版, 2020, 50(6): 2258-2265.
- Ma Miao-miao, Shao Li-yang, Liu Xiang-jie. Application of distributed predictive control in coordinated control of microgrid[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(6): 2258-2265.