

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241037

基于多准则决策分析的新型电力系统配电网 自平衡能力评估方法

余光正¹, 张俊杰¹, 陈甜甜², 刘婧², 杨楠³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;
3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 随着分布式新能源和灵活可调负荷大量接入新型电力系统, 考虑电力电量的平衡体系难以满足日益复杂的源荷特性以及供需关系, 给新型电力系统供需协同运行带来了极大的挑战。为充分利用配电网中灵活性源荷资源的调节特性以提高电网的自平衡能力, 提出了一种基于多准则决策的新型电力系统自平衡能力评估方法。首先, 构建了新型电力系统自平衡能力的评价指标体系, 以有效量化配电网的自平衡水平。其次, 提出了一种基于多准则决策的自平衡能力评估方法, 建立了基于偏好顺序结构的自平衡评估模型。最后, 通过算例分析以及历史数据验证了所提方法的有效性。评估结果可指导新能源、需求侧响应等灵活性调节资源的建设, 以适应新型电力系统在多时间尺度和多应用场景下对灵活可调资源的需求。

关键词: 新型电力系统; 自平衡能力评估; 多准则决策; 偏好顺序结构评估法

A multi-criteria decision analysis-based method for assessing self-balancing capability in new power distribution networks

YU Guangzheng¹, ZHANG Junjie¹, CHEN Tiantian², LIU Jing², YANG Nan³

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 3. College of Electrical
Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: With the large-scale integration of distributed new energy and flexible loads into new power systems, traditional approaches for balancing electric power supply and demand are increasingly inadequate in addressing the complexity characteristics of generation and load, as well as the evolving supply-demand relationships. This presents significant challenges to the coordinated operation of such systems. To harness the regulatory potential of flexible resources within distribution networks and enhance self-balancing capability of power grids, a self-balancing capability assessment method for new power systems is proposed based on multi-criteria decision analysis. First, an evaluation index system is established to quantitatively assess the self-balancing level of the distribution network. Then, a self-balancing capability assessment method based on multi-criteria decision analysis is developed by constructing a evaluation model based on preference order structure. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by example analysis and historical data. The assessment results can guide the construction of flexible resources such as new energy and demand-side response to meet the needs of new power systems across various time scale and application scenarios.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207121).

Key words: new power system; self-balancing capability assessment; multi-criteria decision analysis; preference ranking structure evaluation method

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207121)

0 引言

2020年,中国提出“碳达峰、碳中和”奋斗目标^[1-3],随着社会各方对“双碳”目标理解加深,新型电力系统迅速发展,但新型电力系统的平衡问题也愈发严峻^[4]。新型电力系统自平衡(new power system self-balance, NPS-SB)定义为:新型电力系统在一定时期内发电支撑负荷的能力,通过平衡制度和平衡能量使电力市场能够自发地对“源-荷”进行调整,维护系统功率平衡^[5]。近年来,随着新能源大量并网,电力电量平衡面临着季节性、随机性和波动性等问题^[6-7],导致传统的指标体系和评价方法难以全面精准地评估新型电力系统的平衡能力,不利于电力企业适时调整新型电力系统的发展规划方案和建设重点。随着极端天气的增多,以及负荷类型的变化^[8],对系统的平衡能力影响也随之变得复杂,配电网自平衡能力的评估也更加复杂。

各国基于自身电力行业的发展情况以及资源类型,制定了一系列有关电力电量平衡的市场和机制^[9-10],德国和英国为应对系统电力电量不平衡风险,采用了平衡基团、平衡结算单元等平衡机制,并且文献^[11]从市场结构方面提出了中国构建新的电力电量平衡机制的相关建议;我国在新型电力系统指标体系研究上,也已开展了大量研究,为新型电力系统的发展提供了参考价值^[11-13],但如何深入挖掘系统灵活可靠的调度资源,则需要在技术和方法上进一步深入研究。文献^[14]构建了电力电量平衡评价指标体系,从充裕性、经济性、环保性等外部因素评估了电力电量平衡方案;文献^[15]建立了适应于新能源波动特性的电力平衡时序生产模拟模型,量化研究了新能源高比例情形下的电力平衡问题,并提出了解决该问题的相关措施与建议;文献^[16]提出了区域电网的自平衡度指标和各区域电网间的互平衡度指标。上述文献从电力电量平衡的概念、评估方法、评价指标等多个方面构建了电力系统电力电量平衡指标体系,覆盖了影响电力电量平衡的主要因素,但是随着新型电力系统的发展,传统的电力电量平衡评价方法已不能满足新型电力系统日益复杂的平衡关系。

目前,针对新型电力系统自平衡能力的评估研究,主要集中在评价方法体系的构建与优化方面^[17],已有的方法主要是通过对评价指标进行加权计算得到评价结果^[18],目前应用较多的指标权重计算方法主要包括层次分析法^[19-20]、主成分分析法^[21]、优劣解距离法^[22-24]和灰色关联分析法^[25]等。但仅依赖权重赋值方法,无法全面捕捉指标间的耦合效应,忽

视了指标间的相互作用,并不足以全面评估新型电力系统的自平衡能力;并且大多局限于评估对象在不同场景下的定性比较,没有形成较为完善的评价指标体系。而单独采用主观赋权法或客观赋权法时,可能会有评估结果过于依赖个人判断或仅基于数据的局限性,这不足以准确反映方案间的相对优劣性。

为充分利用配电网中灵活性源荷资源的调节特性以提高电网的自平衡能力,本文提出了一种自平衡能力的评估指标体系,为了更加科学地评估新型电力系统的自平衡能力,进一步建立了一种可靠灵活的多准则决策分析综合评价方法,在此基础上,构建了基于偏好顺序结构(preference ranking organization method for enrichment evaluations, PROMETHEE)的评估模型,该模型充分考虑决策者对不同属性的偏好程度,并且计算结果区分度大、直观性强,决策结果更加可靠。

1 新型电力系统自平衡的内涵

随着新型电力系统的发展,由于分布式能源的广泛接入、源网荷储的灵活互动、用户参与和需求响应市场化等原因^[26],系统构成和特性发生持续而深刻的变化:1)新型电力系统配电网新能源渗透率快速提升,但分布式能源发电难以实现就地平衡,造成负荷需求难以匹配;2)由于新能源汽车、充电桩、数据中心、各类储能等不确定性资源大量接入,系统难以满足日益复杂的新型主体的接入需求;3)随着新能源占比的不断提高,供需双侧与系统调节资源均呈现高度不确定性。在上述变化背景下,新型电力系统的供需平衡和电力供应保障面临着极大的挑战。新型电力系统的供需挑战如图1所示。

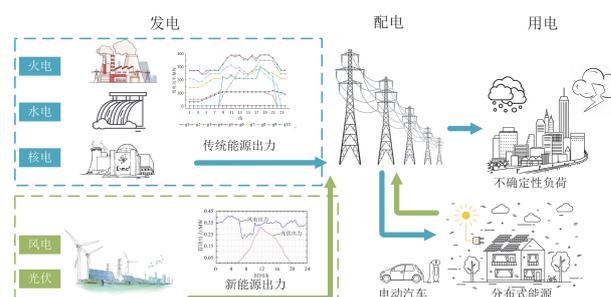


图1 新型电力系统的供需平衡

Fig. 1 Supply and demand balance of a new power system

因此,为充分利用配电网中灵活性源荷资源的调节特性、提高电网的自平衡能力、满足日益复杂的源荷特性以及供需关系,本文提出新型电力系统的自平衡评价体系,量化源荷的协同互动能力,优化灵活性资源的配置。新型电力系统自平衡指系统

利用内部储能、灵活性负荷、电动汽车等灵活性资源对系统进行“源-荷”双向调节，新型电力系统的自平衡能力的定义为

$$B_s^t = \frac{1}{|\sum P_{G,i}^t - \sum P_{L,i}^t|} \quad (1)$$

式中： B_s^t 为系统在 t 时刻的自平衡能力； $P_{G,i}^t$ 为系统在 t 时刻的发电功率； $P_{L,i}^t$ 为系统在 t 时刻的用电功率。当系统的平衡能力较强时，系统由于内部故障或外部因素处于不平衡状态， $P_{G,i}^t - P_{L,i}^t$ 会有较大变化，系统可以调节内部资源，使该差值稳定，并保持在一个相对较小的数值。

电力系统自平衡的概念首先是在传统电网^[27]中提出，但是传统电网的自平衡与新型电力系统的自平衡有较大的差异，具体区别如表1所示。

表1 传统电网自平衡与新型电力系统自平衡的区别

Table 1 Difference between traditional power grid self-balancing and new power system self-balancing

	传统电网自平衡 ^[27]	新型电力系统自平衡 ^[5]
概念	在正常运行状态下，通过上级电网实现自平衡	强调供需失衡状态下通过内部资源的动态调节实现电力电量平衡
思路	基于系统运行需求，对储能设施与发电资源进行协同规划优化	通过对系统当前状态进行评估，规划内部资源以解决供需不平衡
适用范围	微电网	新型电力系统中的各子系统，以及子系统之间的协同运作
手段	源随荷动	源荷互动、双向互动

与传统电网依赖上级电网实现自平衡不同，新型电力系统配电网中含有丰富的可控负荷、储能设施和电动汽车等灵活性资源^[28]。这使得新型电力系统能够综合利用不同类型的电源和具有不同潜力的柔性负荷响应特性与调节能力，从而提升系统的自平衡能力。因此，深入挖掘和分析用户所在区域的源荷类型、峰谷差和能耗水平等数据，利用源荷的双向互动，完善极端场景下的用户避峰和新能源规划综合评价体系，对于推进系统有序用电、供电运行体系的精细化发展具有重要意义。

在新型电力系统中，自平衡能力的评估尤为关键，它不仅强调系统在面对不平衡状态时的恢复稳定性，也体现了系统为适应外部环境变化而进行的内部自我调节能力。由于新型电力系统中存在诸多不确定性，例如风力和光伏发电受天气条件的显著影响，以及负荷侧分布式能源的大量并网，这些因素均增加了系统的不确定性。在新型电力系统的不断发展下，配电网的自平衡能力评估需综合考虑源-荷侧的变化情况。这要求评估时不仅要关注传统的

供需平衡，还要深入分析极端条件下的系统响应，从而实现对系统内部资源的优化分配。

2 新型电力系统自平衡能力评价指标体系构建

衡量自平衡能力的关键在于稳定状态下的“源-荷”可变量^[5]。自平衡的基本原理是调用系统内的储能、电动汽车等灵活性资源，满足不可控的新能源、随机性负荷等不确定性资源，实现“源-荷”资源的灵活匹配。

2.1 新型电力系统自平衡能力评价指标

为充分利用配电网中灵活性源荷资源的调节特性以提高电网的自平衡能力，本文提出以下指标。

1) 源荷相似度

由于新型电力系统的稳定性在很大程度上取决于发电与负荷之间的平衡，为直观地展示发电与用电之间的匹配情况，本文提出了源荷相似度指标以量化电源输出与负荷需求之间的相似度，为评估系统的自平衡能力提供了一个直观的度量。

$$\varphi_B^{n,t} = \frac{\sum P_{WG}^t + \sum P_{PV}^t + \sum P_{ess}^t + \sum P_{DE}^t}{\sum P_{load}^t} \quad (2)$$

式中： $\varphi_B^{n,t}$ 为区域 n 在 t 时刻的源荷相似度指标； P_{WG}^t 、 P_{PV}^t 、 P_{ess}^t 、 P_{DE}^t 分别为 t 时刻平衡区内风机、光伏、储能和传统能源发电的输出功率； P_{load}^t 为负荷在 t 时刻的功率需求。

2) 可调能源占比

可调能源指的是以火电备用容量和储能为代表的在新型电力系统中可稳定运行的部分，并且可以减少用电缺口，不仅能够提高电力系统的灵活性和可控性，还能够有效应对可再生能源的间歇性和不确定性。为此，本文提出了可调能源占比指标，以度量系统对环境变化的适应能力。

$$\varphi_A^{n,t} = \frac{\sum \Delta P^{n,t}}{\sum P_{L,max}^{n,t}} \quad (3)$$

式中： $\varphi_A^{n,t}$ 为 n 区域在 t 时刻的可调能源占比指标； $P_{L,max}^{n,t}$ 为系统在 t 时刻达到的最大负荷； $\Delta P^{n,t}$ 为系统内以备用电源和储能为主的可调节资源。

3) 新能源的波动率

以光伏和风电为代表的新能源在推动能源转型和提升能源效率方面将发挥更加重要的作用，但新能源出力易受天气影响，不利于电力系统的稳定运行，为定量描述其不同天气条件下的波动程度，本文提出新能源出力波动率指标。

$$\varphi_i^{n,t} = \left| \frac{P_N^{t+1} - P_N^t}{\bar{P}_N} \right| \quad (4)$$

式中: $\varphi_i^{n,t}$ 为区域 n 在 t 时刻的新能源波动率指标; P_N^t 、 P_N^{t+1} 分别为 t 、 $t+1$ 时刻的新能源出力; \bar{P}_N 为新能源的平均出力。

4) 气象敏感负荷占比

气象敏感负荷指标量化气象因素对电力需求的影响, 为系统规划和运行提供关键参考, 提高了系统在面对极端天气的韧性, 并进一步提升系统在面对不确定风险的自平衡能力。

$$\varphi_w^{n,t} = \frac{\sum \Delta P_{load}^{n,t}}{\sum P_{load}^t} \quad (5)$$

式中: $\varphi_w^{n,t}$ 为区域 n 在 t 时刻的气象敏感型负荷占比指标; $\Delta P_{load}^{n,t}$ 为受气象因素影响较大的负荷。

5) 可控负荷占比

随着分布式新能源大量接入电力系统, 仅依靠发电资源难以应对新型电力系统严峻的保供形势, 而分散在配电网中的可控负荷具备很强的调控潜力, 可控负荷为应对新能源渗透率攀升引发的供需

失衡提供了有效的解决思路。

$$\varphi_V^{n,t} = \frac{\sum \Delta P_V^{n,t}}{\sum P_{load}^t} \quad (6)$$

式中: $\varphi_V^{n,t}$ 为 n 区域在 t 时刻的可控负荷占比指标; $\Delta P_V^{n,t}$ 为区域 n 中的可控负荷。

6) 供电均衡度

供电均衡度通过可用发电容量与负荷预测的差与负荷预测之比的绝对值量化周期内各个时段供电充裕性均衡的程度, 确保在电力可靠供应前提下最大限度提高新能源消纳水平。

$$\varphi_{Bd}^{n,t} = \left| \frac{P_G^{n,t} - P_L^{n,t}}{P_L^{n,t}} \right| \quad (7)$$

式中: $\varphi_{Bd}^{n,t}$ 为区域 n 在 t 时刻的供电均衡度指标; $P_G^{n,t}$ 为 t 时刻的可用发电容量; $P_L^{n,t}$ 为 t 时刻的负荷预测功率。

2.2 新型电力系统自平衡评估指标体系

传统电力电量平衡评估指标如图 2 所示, 自平衡评估指标体系如图 3 所示。

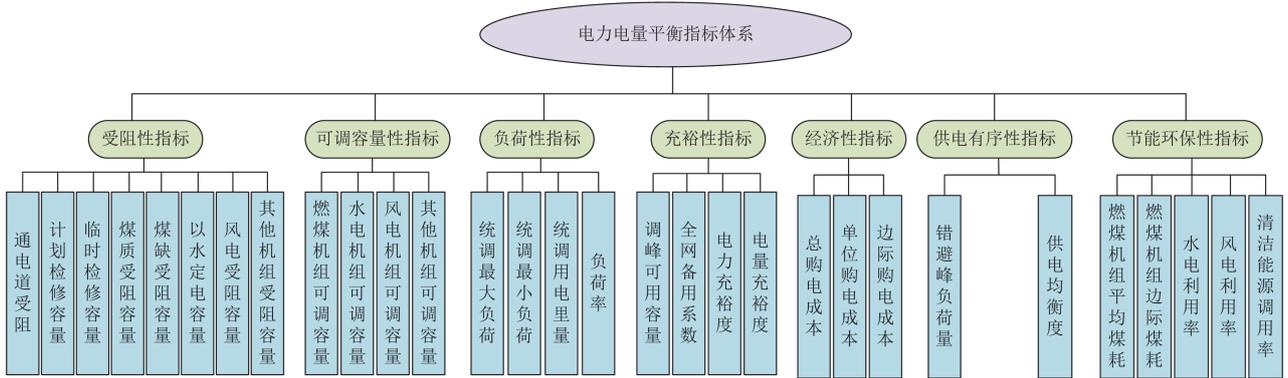


图 2 传统电力电量平衡评估指标

Fig. 2 Traditional power and energy balancing evaluation index

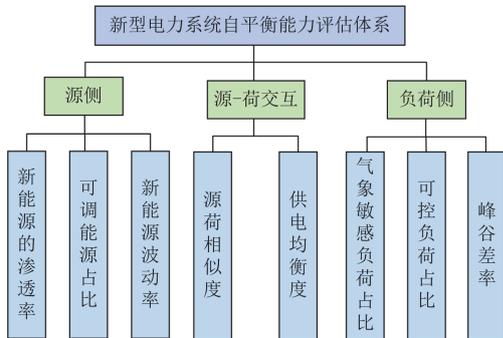


图 3 新型电力系统自平衡能力评估指标体系

Fig. 3 Evaluation index system of self-balancing capability of a new power system

不同于以资源配置、环保性、经济性等为目标的传统电力电量平衡评价体系, 新型电力系统的自平衡评估指标以“源-荷”可调量衡量自平衡能力, 通过子系统的分布自治, 实现系统整体的自平衡。本文在原创性指标的基础上构建了可调能源占比、新能源波动率、新能源渗透率^[18]源侧指标, 气象敏感负荷占比、可控负荷占比、峰谷差率^[28]负荷侧指标, 以及源荷相似度、供电均衡度源荷交互性指标。

相对于传统电力电量平衡指标, 自平衡指标在新型电力系统中更侧重于描述灵活性资源的调节能力, 尤其是在供需波动时的自我调节。自平衡的目标是通过内部资源配置实现系统的整体平衡, 因此

自平衡指标更加强调多周期的时空协调。而电力电量平衡的目标是以经济、低碳、安全的方式调度火电、水电、核电和新能源发电。相比之下，自平衡指标更加侧重于系统内分布式发电、储能等灵活性资源的相互配合，以提升系统在面对不平衡时的自我调节能力。电力电量平衡指标与自平衡指标的区别如表 2 所示。

表 2 电力电量平衡指标与自平衡指标的区别

Table 2 Difference between electric power and energy balancing index and self-balancing index

	电力电量平衡指标 ^[15]	自平衡指标
目标	通过单体指标反映电力电量平衡的某一方面特征	描述新型电力系统中灵活性资源的调节能力
时间尺度	单一时段的变化，分别考虑短期或长期的平衡情况	跨周期协同分析
考虑因素	系统负荷、气象环境因素和电站容量的随机性	源侧以及荷侧的不确定性和复杂性
指标内容	包括工作容量平衡、检修容量平衡和备用容量平衡	注重系统内部灵活性“源-荷”资源的优化配置和调节能力
优化目标	确保电力系统的经济性、可靠性、环保性	提高系统的自调节能力

3 自平衡指标的多准则决策方法

在评估新型电力系统配电网的自平衡能力时，传统评估方法依靠计算结果的简单累计，忽略了指标间相互影响，且易受标准化方法的影响，限制了其在复杂电力系统中的应用。因此，本文提出一种多准则决策方法，综合评估新型电力系统配电网的权重配置，以揭示决策者对各指标的偏好，提高了评估的准确性。

3.1 主观决策计算

依据专家主观决策确定新型电力系统中平衡指标的相对重要性，构造出以待评测区域的数量 m 为行，以评估指标的数目 n 为列的评价矩阵 $X_{m \times n}$ 。由于各指标的量纲不同，首先对指标进行归一化处理得到规范化矩阵 ω 。

$$\omega_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (8)$$

式中： ω_{ij} 为规范化矩阵 ω 中第 i 行、第 j 列的元素； x_{ij} 为评价矩阵 $X_{m \times n}$ 的元素。

以此构建评价矩阵，并通过特征向量法求出各指标的权重，采用最大特征值及其对应的特征向量，经过归一化处理，得到第 k 层的权重向量 $\omega_j^{(k)}$ 为

$$\omega_j^{(k)} = [\omega_1^{(k)}, \omega_2^{(k)}, \dots, \omega_n^{(k)}] \quad (9)$$

为确保每层判断矩阵的有效性，需要对自平衡的判断矩阵进行一致性检验，若通过一致性检验则采用此判断矩阵，得到主观权重矩阵 ω_j 。

3.2 客观决策计算

本文提出一种基于 Shapley 值的客观决策计算方法，以评估配电网子区域的自平衡能力，通过量化区域间的组合贡献度来确定决策权重。这种方法充分考虑了子区域间的相互影响，提高了评估的可靠性和稳定性，为新型电力系统配电网的自平衡能力提供了一种精确的评估手段。

1) 首先要对数据进行归一化处理，得到标准化评估矩阵 $V_{m \times n}$ 。

$$v_{ij}^+ = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (10)$$

$$v_{ij}^- = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

式中： v_{ij}^+ 、 v_{ij}^- 分别为指标与自平衡能力呈正相关和负相关的关系； x_{\max} 、 x_{\min} 分别为相同指标中的最大、最小值。

2) 计算不同地区之间的组合贡献度，设 $N = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 为待评估区域的集合，其评估指标子集 S 所对应的实函数为 $V(S)$ ， $V(\emptyset) = 0$ ，若地区之间的关联性很弱， $V(S_1 \cup S_2) > V(S_1) + V(S_2)$ ， $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ ，则组合贡献度占比较大，可以通过乘以系数 1.2 来增大不同地区组合的贡献度；相对地，如果地区间关联性较强， $V(S_1 \cup S_2) < V(S_1) + V(S_2)$ ， $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ ，则组合贡献度占比较小，可以通过乘以系数 0.8 来减小不同地区组合的贡献度。

$$v(1, 2, \dots, n) = \begin{cases} 0.8 \sum_{i=1}^n v(i), v(n) \in [0, 1] \\ 1.2 \sum_{i=1}^n v(i), v(n) \in [0, 1] \end{cases} \quad (12)$$

式中： $v(1, 2, \dots, n)$ 为指标的组合贡献度； $v(i)$ 为评价矩阵第 i 行元素归一化后的数值。

3) 计算各指标的 Shapley 值，即对应的各指标权重。

$$\omega_j^k = \sum_{S \subset N} \frac{(n - |S|)! (|S| - 1)!}{n!} [v(|S|) - v(|S|/n)] \quad (13)$$

式中： ω_j^k 为基于 Shapley 值计算的初始权重； $|S|$ 为子集中地区指标组合的个数； $|S|/n$ 为子集去掉指标 n 之后的组合。由于求得的权重并不是统一的，需

对指标进行归一化处理得到最终的客观权重矩阵 v_j 。

3.3 多准则组合决策

本文提出的多准则决策方法有效解决了自平衡能力评估中的不确定性问题, 兼顾了指标间的相互影响及不同地区配电网的发展差异, 增强了评估的灵活性与可靠性。

$$\psi_j = \alpha \times \omega_j + (1 - \alpha) \times v_j \quad (14)$$

式中: ψ_j 为综合权重; α 为多准则决策相关系数, 参考文献[14], 在本文中取 $\alpha = 0.5$ 。

4 基于 PROMETHEE-II 的自平衡能力评估方法

偏好顺序结构评估法是一种多准则决策分析工具, 其核心在于依据多个决策标准对备选方案进行排序和评估, 以识别最优决策。鉴于新型电力系统配电网的复杂性和多维性, 本文提出了基于线性准则的 PROMETHEE-II 方法进行评估。

4.1 优势函数

在 PROMETHEE-II 方法中, 优势函数作为该方法的核心要素, 在某一特定评价指标上, 能够量化配电网中一个区域相对于另一个区域的优势程度。

1) 标准化决策矩阵

在计算权重时已经对原始指标进行了标准化以及归一化处理得到了标准化权重矩阵 $V_{m \times n}$ 。

2) 确定优势函数

在矩阵标准化后, 考虑到决策者理性判断的局限性, 设置相应的偏好函数。常见的优势函数有 6 种, 为进一步量化自平衡能力, 本文提出新型电力系统自平衡评估的线性准则, 如式(15)所示。

$$P_j(y_{ij}, y_{kj}) = \begin{cases} 0, & d_j(y_{ij}, y_{kj}) \leq 0 \\ \frac{d_j(y_{ij}, y_{kj})}{v}, & 0 < d_j(y_{ij}, y_{kj}) \leq v \\ 1, & d_j(y_{ij}, y_{kj}) > v \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_j(y_{ij}, y_{kj})$ 为 y_{ij} 关于 y_{kj} 在各属性下的评价差值在 $[0, 1]$ 内的函数; y_{ij} 、 y_{kj} 均为标准化权重矩阵 $V_{m \times n}$ 的元素; $d_j(y_{ij}, y_{kj})$ 为 y_{ij} 与 y_{kj} 的差, 即 $d_j(y_{ij}, y_{kj}) = y_{ij} - y_{kj}$; v 为线性准则的阈值, 该阈值可以按照不同待评估区域的不同运行条件以及新能源配置进行调整。本文构建的线性准则便于直接比较不同方案的偏好指数, 简化决策过程, 并且线性准则的阈值可以根据不同的待测区域进行修改, 以

反映决策者在不同区域评估时的差异, 从而提高了评估新型电力系统配电网自平衡能力的效率和灵活性。在线性准则的计算中, 有

$$v = \max(f_j) - \min(f_j) \quad (16)$$

式中: f_j 为标准化权重矩阵 $V_{m \times n}$ 的列向量; $\max(f_j)$ 、 $\min(f_j)$ 分别为评价矩阵第 j 列元素中的最大、最小值。

3) 求解偏好函数

将所有属性的偏好函数相加, 得到多属性偏好指数, 并乘以权重数值。

$$I_j(y_{ij}, y_{kj}) = \sum_{j=1}^n (\psi_j \times P_j(y_{ij}, y_{kj})) \quad (17)$$

式中: $I_j(y_{ij}, y_{kj})$ 为偏好函数。

4.2 净流值计算

净流值反映了各备选方案相对于其他方案在所有准则上的综合优势, 是评估方案优劣的关键。

1) 计算正、负流值

$$\phi^+(A_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m I_j(y_{ij}, y_{kj}) \quad (18)$$

$$\phi^-(A_i) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m I_j(y_{kj}, y_{ij}) \quad (19)$$

式中: ϕ^+ 、 ϕ^- 分别为正流和负流。正流值反映某区域在各指标上相对于其他区域的偏好程度, 负流值则表示方案的不利程度。

2) 计算净流值

净流值定义为

$$\phi = \phi^+ - \phi^- \quad (20)$$

式中: ϕ 为待测区域的净流值。根据净流值大小对样本进行总体排序, 净流值越大, 自平衡能力越强。

4.3 新型电力系统自平衡能力评估流程

本文提出多准则赋权法结合 PROMETHEE-II 方法, 对新型电力系统的自平衡能力进行全面评价。评价流程始于构建一个系统的指标体系, 涵盖关键性能指标, 确保评价的多维度和全面性, 评估流程如图 4 所示。

本文提出的多准则决策法, 确保了权重赋值的科学性和客观性, 提高了配电网自平衡能力评估的准确性和可靠性。并通过基于线性准则的 PROMETHEE-II 计算净流值, 明确了各地区的自平衡能力排序, 有效展示了区域间指标的强弱关系。这种方法为新型电力系统配电网的自平衡能力评估提供了一种科学、定量的决策支持工具。

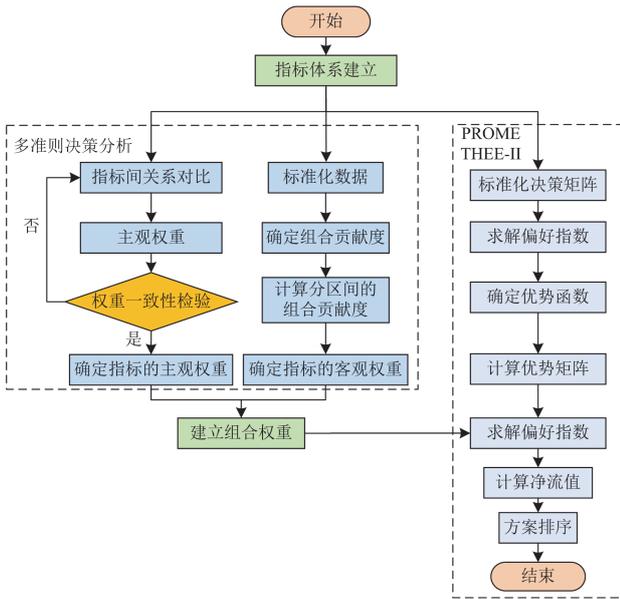


图 4 新型电力系统自平衡能力评估流程图

Fig. 4 Flow chart of self-balancing capability evaluation of a new power system

5 算例分析

5.1 算例描述与数据处理

1) 算例描述

在本文中，对 4 个具有不同特征的地区进行了深入分析，以构建电力系统自平衡能力的综合性评估体系电网的分区拓扑如图 5 所示。

根据某地区实际发展情况，并结合当地历史电网运行数据与实际发展情况，本文选取了 4 个典型的区域某日运行数据，得到表 3 的评价指标数值。分区一是波动区，发电资源和负荷均波动较大；分区二是平衡区，区域内发电资源和负荷资源都较为丰富；分区三是输入区，发电资源较单一，负荷种类丰富；分区四是输出区，有较多发电资源，负荷类型较少。在进行区域的筛选时，本文考虑平衡差异较大的区域数据，这些地区在电力负荷特性、发电资源的多样性以及应对极端天气的响应能力上各有差异，确保所选区域能够全面反映新型电力系统在不同条件下的自平衡能力。

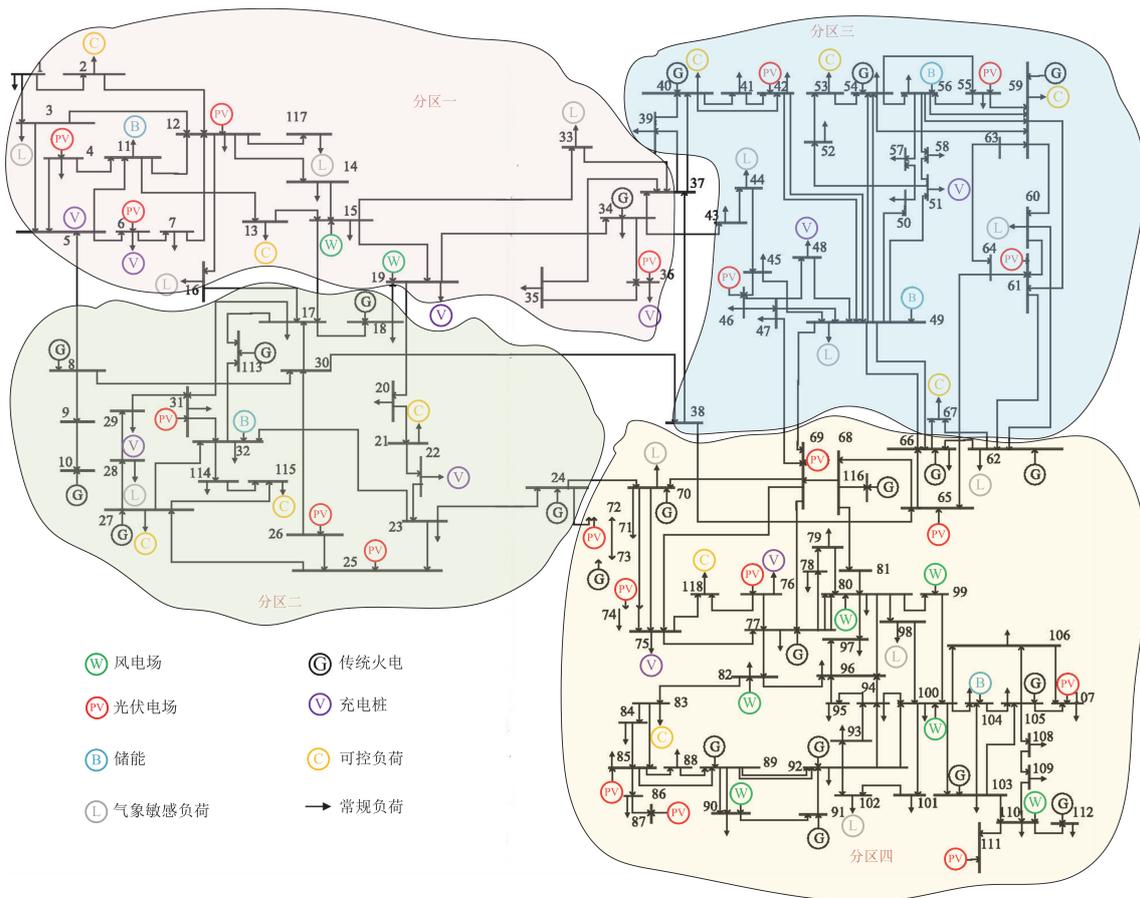


图 5 IEEE118 节点分区拓扑图

Fig. 5 Topology of the IEEE118-bus zone

表3 分区自平衡水平评价指标数值
Table 3 Evaluation index value of self-balancing level of each zone

指标名称	分区一	分区二	分区三	分区四
源荷相似度	30.4	45.94	29.32	25.47
可调能源占比	27.5	43.57	35.64	13.34
新能源的渗透率	40.58	26.83	27.32	59.37
新能源波动率	47.32	37.63	24.37	19.34
气象敏感负荷占比	32.44	26.58	34.32	10.34
可控负荷占比	23.76	29.34	16.34	13.78
峰谷差率	60.29	20.90	56.27	30.47
供电均衡度	40.34	10.78	13.58	17.65

2) 数据预处理

在进行电力系统自平衡能力评估之前, 为消除不同指标单位差异可能导致的评估偏差, 本文首先对原始数据进行了无量纲化和一致性处理。

在归一化矩阵中, 每列代表一个特定指标, 每行对应一个待测区域。数值越接近 1, 表示该指标相对于其他待测区域的表现越优; 而数值越接近 0, 则表明该指标的表现相对较差。

5.2 自平衡能力评估结果分析

1) 基于多准则决策的权重计算

为构建电力系统自平衡能力的综合性评估体系, 本文提出了多准则决策赋权法来计算各指标的权重, 计算结果如图 6 所示。

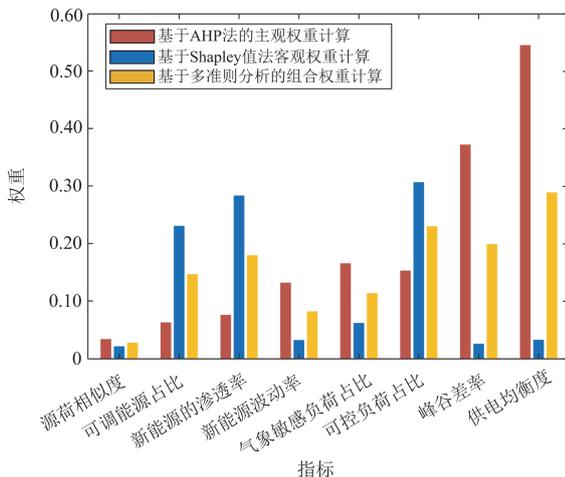


图6 自平衡指标的多准则决策权重计算

Fig. 6 Multi-criterion decision weight calculation of self-balancing index

通过多准则决策求得组合权重, 处于主观权重和客观权重之间, 在一定程度上弱化了人为主观因素或数据差异因素带来的权重偏差, 使得权重分

配更加合理。在 Shapley 值法的应用过程中, 考虑到分区一与分区三、分区二与分区四之间较低的关联程度, 选取 1.2 作为这些地区间的关联度系数, 以体现它们相对独立的特性。对于其余地区, 考虑到它们之间相互影响程度较高, 选择 0.8 作为关联度系数。

2) 基于线性准则的偏好顺序结构法计算结果

根据偏好顺序结构法中的偏好函数, 展示不同区域在 8 个关键评价指标上的偏好分布。偏好函数呈现了各区域在各个评价指标上的优势和劣势, 而且提供了一种强有力的视觉工具, 用以比较不同区域的性能。通过深入分析不同地区的指标分布, 决策者能够清晰地识别出不同区域在关键评价指标上的表现, 从而为特定区域的深入规划和优化提供依据。

计算 4 个分区的正流值与负流值, 并据此得出各分区的净流值。如图 7 所示, 分区二具有最大的净流值, 从而表明其自平衡能力在 4 个分区中是最强的。相比之下, 分区一的净流值最小, 表明其自平衡能力在 4 个分区中相对最弱。

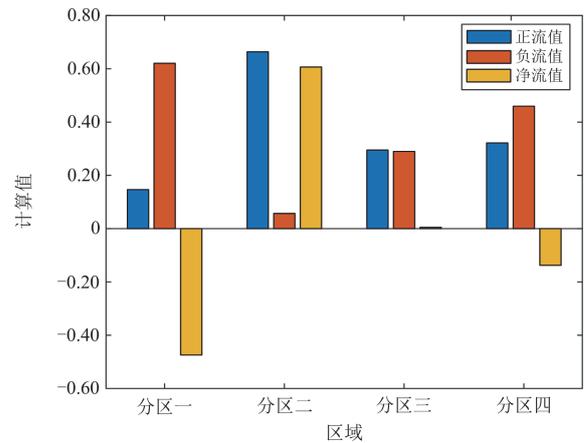


图7 PROMETHEE-II 计算结果

Fig. 7 Calculation results of PROMETHEE-II

5.3 自平衡指标与电力电量平衡指标对比

电力电量平衡指标体系包含了资源配置、经济效益、可靠性等多种评价目标, 评估结果如图 8(a) 所示, 但由于新能源(风电、光伏等间歇式能源)大规模接入, 电力电量平衡面临的不确定性和复杂性显著增加, 传统电力电量平衡分析方法难以适应这种变化。电力电量平衡指标和自平衡指标的应用效果如图 8(b)所示, 突出了自平衡指标在量化源荷协同能力方面的优势。由于本文未考虑经济以及环境因素, 因此本文的经济性指标和环境因素指标参考文献[14]。

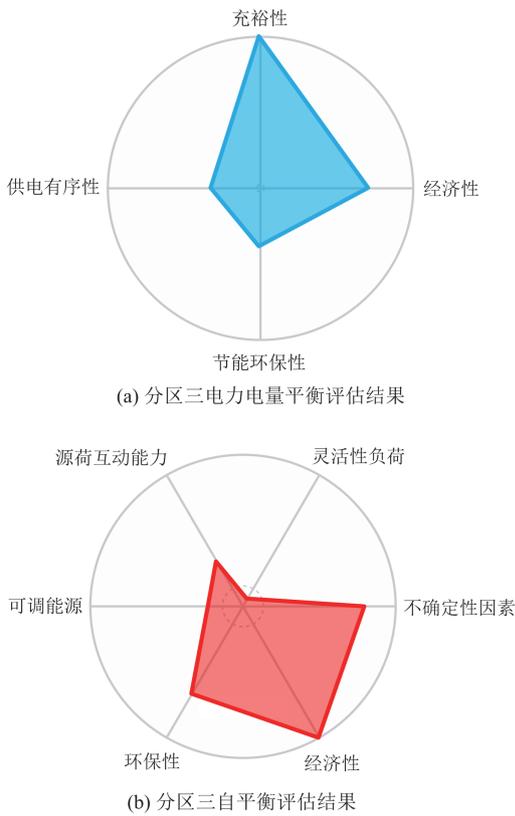


图 8 电力电量平衡与自平衡评估结果

Fig. 8 Electric power and energy balancing and self-balancing evaluation results

由图 8 电力电量平衡指标和自平衡指标对比结果可得，自平衡指标从源侧动态特性、荷侧响应潜力、系统协同能力等多个维度进行自平衡评估，并进一步识别系统在源荷平衡的薄弱环节以及扰动因素，为规划上实现源荷布局的统筹优化运行奠定基础。

5.4 评估方法对比

本文在新型电力系统自平衡能力决策过程中，提出了一种结合主观与客观因素的决策方法。该方法通过引入量化标准，避免了仅依赖主观或者客观判断的缺陷，从而增强了决策的科学性和全面性。为验证本文所提出的多准则决策的优越性，采用正态云模型展现指标的分布情况，如图 9 所示。

在新型电力系统的自平衡能力决策中，客观决策方法因其高确定性而展现出云滴分布集中和超熵值低的特点。然而，这种方法可能因过度依赖计算而忽略了其他重要因素。与此同时，新型电力系统运行中的不确定性和指标间的相互影响要求决策方法能够适应这种复杂性。虽然主观决策纳入了更多不确定因素，但专家的主观性可能导致不确定性程度升高，进而影响决策的可靠性与稳定性。在新型

电力系统复杂且动态变化的背景下，单独的主观决策或客观决策在灵活性和适应性方面显得不足。

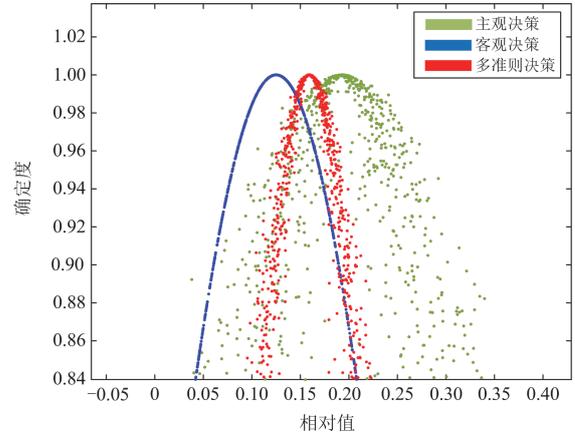


图 9 不同决策方法的正态云分布图

Fig. 9 Normal cloud distribution strategy with different decision methods

本文提出的 PROMETHEE-II 在进行评估的过程中，充分体现了决策者对各属性的偏好，其计算结果具有明显的辨识度和直观性，从而增强了评估结果的可靠性与灵活性。如图 10 所示，在评估自平衡能力相近的区域时，PROMETHEE-II 与逼近理想解排序法、加权求和法相比，区分度更大；由于加权求和法忽略了指标间的冲突，导致其在分区一的评估结果与 PROMETHEE-II 法和逼近理想值排序法产生了显著偏差，但其余分区间的评估结果一致，验证了本文所提方法的正确性。

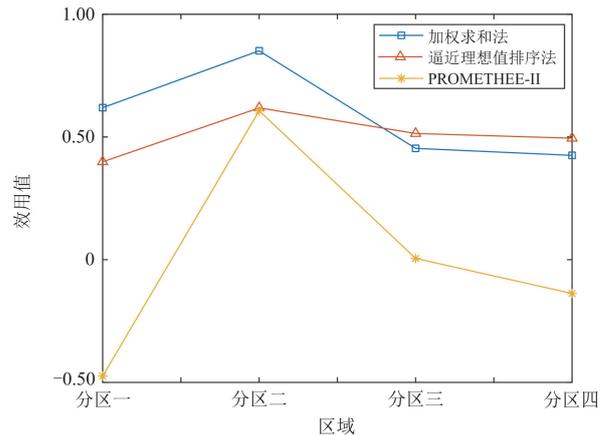


图 10 不同评估方法下各分区的效用值分布趋势图

Fig. 10 Distribution trend of utility value of each partition with different evaluation methods

6 结论

1) 针对新型电力系统的发展情况，本文不仅综

合考虑了系统特性和运行机制的新变化, 而且建立了一套针对新型电力系统自平衡的指标体系, 以全面评价新型电力系统的发展状况。

2) 本文提出了一种多准则决策方法, 进一步细化了指标的计算过程。这种方法不仅综合考虑了各指标之间的相互关系, 而且确保了指标权重的科学性和合理性, 而且充分考量了不同分区之间的相互影响和协调性。

3) 在本研究的具体评估环节, 建立了基于PROMETHEE-II的多决策分析模型, 并且基于该方法优势函数的特征提取能力, 构建了新型电力系统自平衡能力的评估框架。PROMETHEE-II模型通过处理各分区的偏好指数, 有效地评估了不同分区及指标对系统自平衡能力的具体影响。

参考文献

- [1] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 17-25.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 17-25.
- [2] 王金丽, 李丰胜, 解芳, 等. “双碳”战略背景下新型配电系统技术标准体系[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 22-31.
WANG Jinli, LI Fengsheng, XIE Fang, et al. Research on technical standard system of new distribution system under double-carbon strategy[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 22-31.
- [3] 印欣, 张锋, 阿地利·巴拉提, 等. 新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 115-124.
YIN Xin, ZHANG Feng, ADILI·Balati, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 115-124.
- [4] 黄河, 王建学, 肖云鹏, 等. 新型电力系统电力电量平衡分析关键技术与研究框架[J]. 电力建设, 2024, 45(9): 1-12.
HUANG He, WANG Jianxue, XIAO Yunpeng, et al. Key technologies and research framework for the power and energy balance analysis in new-type power systems[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 1-12.
- [5] 鞠平, 姜婷玉, 黄桦. 浅论新型电力系统的“三自”性质[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2598-2608.
JU Ping, JIANG Tingyu, HUANG Hua. On the “three self” nature of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2598-2608.
- [6] 郭雪丽, 胡志勇, 王爽, 等. 考虑大规模风光分层接入的配电网多层协调无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 113-122.
GUO Xueli, HU Zhiyong, WANG Shuang, et al. A multi-layer coordinated reactive power optimization method for a distribution network considering large-scale distributed wind-photovoltaic hierarchical access[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 113-122.
- [7] 孙志媛, 彭博雅, 孙艳. 考虑多能互补的电力电量平衡优化调度策略[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 115-122.
SUN Zhiyuan, PENG Boya, SUN Yan. Optimal dispatch strategy of power and electricity balance based on multi-energy complementation[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 115-122.
- [8] 余光正, 陆柳, 汤波, 等. 基于云图特征提取的改进混合神经网络超短期光伏功率预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6989-7003.
YU Guangzheng, LU Liu, TANG Bo, et al. An improved hybrid neural network ultra-short-term photovoltaic power forecasting method based on cloud image feature extraction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6989-7003.
- [9] 刘秋华, 姜亚熙, 张正延, 等. 德国与英国电力市场平衡机制对比分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14): 8-15.
LIU Qiuhua, JIANG Yaxi, ZHANG Zhengyan, et al. Comparative analysis of German and British electricity market balancing mechanisms and implications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 8-15.
- [10] NARAJEWSKI M. Probabilistic forecasting of German electricity imbalance prices[J]. Energies, 2022, 15(14).
- [11] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4342.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the source-grid-load-storage architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [12] 李聚聪, 李荣敏, 荀超, 等. 新型电力系统指标体系研究[J/OL]. 电气工程学报: 1-11[2024-12-16]. <http://hp.kns.cnki.net/shiep.vpn358.com/kcms/detail/10.1289.TM.20231012.1633.014.html>.
LI Jucong, LI Rongmin, XUN Chao, et al. Research on the new power system index system[J/OL]. Journal of Electrical Engineering: 1-11[2024-12-16]. <http://hp.kns.cnki.net/shiep.vpn358.com/kcms/detail/10.1289.TM.20231012.1633.014.html>.
- [13] 张磊, 李延, 谷思庭, 等. 新型电力系统配电自动化安全可靠防护模型及评价体系[J]. 微电子学与计算机, 2023, 40(12): 70-80.

- ZHANG Lei, LI Yan, GU Siting, et al. Security and trustworthy protection model and evaluation system of distribution automation under the new power system[J]. *Microelectronics & Computer*, 2023, 40(12): 70-80.
- [14] 蒲天骄, 陈乃仕, 葛贤军, 等. 电力电量平衡评价指标体系及其综合评估方法研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(1): 250-256.
- PU Tianjiao, CHEN Naishi, GE Xianjun, et al. Research on evaluation index system and synthetical evaluation method for balance of electric power and energy[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 250-256.
- [15] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3979-3986.
- LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [16] 成后炉, 蔺红. 提高风电消纳能力的区域电网动态划分[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(12): 26-32.
- CHENG Houlu, LIN Hong. Dynamic partition of regional power grids to improve wind power accommodation capacity[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(12): 26-32.
- [17] 于浩, 张大海, 赵轩, 等. 基于 Apriori-ANP 的电动汽车充电站并网性能综合评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24): 121-133.
- YU Hao, ZHANG Dahai, ZHAO Xuan, et al. Comprehensive evaluation method of the grid-connected performance of an electric vehicle charge and discharge station based on an Apriori-ANP[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24): 121-133.
- [18] 易俊, 林伟芳, 任萱, 等. 新型电力系统发展水平指标体系构建及综合评价方法研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(9): 3758-3768.
- YI Jun, LIN Weifang, REN Xuan, et al. Research on construction of index system and comprehensive evaluation method of development level of new power system[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(9): 3758-3768.
- [19] 计蓉, 侯慧娟, 盛戈峰, 等. 基于组合赋权法和模糊综合评价的电力设备状态数据质量评估[J]. *高电压技术*, 2024, 50(1): 274-281.
- JI Rong, HOU Huijuan, SHENG Gehao, et al. Data quality assessment for power equipment condition based on combination weighing method and fuzzy synthetic evaluation[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(1): 274-281.
- [20] BRANKA G U, BUDIMIRKA M. Ranking construction of small hydro power plants using multi-criteria decision analysis[J]. *Renewable Energy*, 2021, 172: 1174-1183.
- [21] 徐崇钧, 于鹤洋, 朱琪, 等. 基于多元特征分析的居民非侵入式相似电器辨识算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 111-121.
- XU Chongjun, YU Heyang, ZHU Qi, et al. Non-intrusive identification algorithm of residents' similar electrical appliances based on multivariate feature analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(13): 111-121.
- [22] WU Xingxing, ZHU Zhiyi, CHEN Chuan, et al. A monotonous intuitionistic fuzzy TOPSIS method under general linear orders via admissible distance measures[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(5): 1552-1565.
- [23] CHEN Jinqiang. Fault prediction of a transformer bushing based on entropy weight TOPSIS and gray theory[J]. *Computing in Science & Engineering*, 2019, 21(6): 55-62.
- [24] MATHEW M, CHAKRABORTTY R K, RYAN M J. Selection of an optimal maintenance strategy under uncertain conditions: an interval Type-2 fuzzy AHP-TOPSIS method[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2020, 69(4): 1121-1134.
- [25] 钟嘉庆, 王璐, 赵楠. 基于灰色关联度和证据理论的电源规划综合评价指标体系研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(8): 95-101.
- ZHONG Jiaqing, WANG Lu, ZHAO Nan. Comprehensive evaluation index system of generation planning based on gray correlation degree and evidence theory[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(8): 96-101.
- [26] 建设更高水平开放型经济新体制推动能耗双控逐步转向碳排放双控[N]. *人民日报*, 2023-07-12(001).
- [27] 王晓毅, 唐忠. 考虑供需自平衡的独立运行能力的并网型微电网系统容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(5): 74-82.
- WANG Xiaoyi, TANG Zhong. Capacity optimization of grid connected microgrid considering self-balance and independent operation capability[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42(5): 74-82.
- [28] LI Junhua, MU Gang, ZHANG Jiahui, et al. Dynamic economic evaluation of hundred megawatt-scale electrochemical energy storage for auxiliary peak shaving[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(3): 1-18.

收稿日期: 2024-08-04; 修回日期: 2024-12-16

作者简介:

余光正(1987—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统电力电量平衡分析, 新能源发电功率预测等。

E-mail: powerygz@shiep.edu.cn

(编辑 张颖)