文章编号：1000-3673（2024）09-3758-11　　中图分类号：TM 721　　文献标志码：A　　学科代码：470·40

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

易俊，林伟芳，任萱，崔艳妍，韩凝晖
（中国电力科学研究院有限公司，北京市 海淀区 100192）

Research on Construction of Index System and Comprehensive Evaluation Method of Development Level of New Power System

YI Jun, LIN Weifang, REN Xuan, CUI Yanyan, HAN Ninghui
(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: A scientific and reasonable evaluation method of the development level of the new power system is of great significance for the planning and construction of the new power system. This article proposes an evaluation index system of the development level of the new power system based on the five basic characteristics of the new power system, including core indexes and innovative indexes. Each index's definition and calculation methods are clarified, and a comprehensive evaluation method of the development level of the new power system based on index-level grading is proposed. The calculation results show that the index system and evaluation method proposed in this article apply to evaluating the development level of new power systems with different energy endowments and grid structures. It can quantitatively evaluate the construction effectiveness of new power systems, clarify the level of development of new power systems, and provide decision-making opinions for the key planning and construction of new power systems in the later stage, which is conducive to promoting the construction process of new power systems in China.

KEY WORDS: new power system; development level evaluation; index system; core index; innovative index

摘要：对新型电力系统发展水平进行科学、合理评价对于新型电力系统的规划建设具有重要意义。该文基于新型电力系统五大基本特征构建了包含核心指标和创新指标的新型电力系统发展水平评价指标体系，明确了各项指标的定义与计算方法，提出了基于指标水平分级的新型电力系统发展水平综合评价方法。算例结果表明，该文所提指标体系及评价方法适用于不同能源禀赋与电网结构的新型电力系统发展水平评价，可以量化评估新型电力系统的建设成效，明确新型系统发展水平所处等级，为后期新型电力系统的重点规划和建设提供决策意见，有利于推进我国新型电力系统的建设进程。

关键词：新型电力系统；发展水平评价；指标体系；核心指标；创新指标

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2291

0　引言

2021 年 3 月，中央财经委员会第九次会议提出构建新型电力系统的战略目标，为新时代能源电力发展指明了科学方向[1]。新型电力系统构建是一项系统性工程，涉及范围广、区域多，规划建设时须遵循“全国一盘棋”原则，先立后破，统筹兼顾。目前我国仍处于新型电力系统建设的探索阶段，对于新型电力系统的发展方向及建设目标尚未形成统一、清晰的认知，缺少科学方法论的指导，给新型电力系统规划设计工作带来了巨大挑战。同时，在新型电力系统不断建设与完善的过程中，将产生不同于传统电力系统的结构和特性[2-8]，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发展水平和建设成效，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。因此，亟待开展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，为科学建设新型电力系统指明方向。

目前，国内外已经在电力系统指标体系及综合评价方法方面开展了大量研究。在评价指标体系研究方面，各国均基于自身基本国情以及电力行业发展阶段的不同制定了一系列指标体系[9-10]。欧盟提出了智能电网收益评价指标体系[11-12]，由于欧洲面

基金项目：国家电网有限公司总部技术咨询项目(新型电力系统实施路径深化研究)。

Project Supported by Technical Consulting Project of State Grid Corporation of China (Deepening Research on Implementation Path of New Power Systems).

临巨大的减排压力和资源相对匮乏的现状，该指标体系重点对新能源开发利用水平和节能减排效益进行评估；美国提出了美国能源部(Department of Energy，DOE)智能电网发展评价指标体系[13-14]和美国电科院(Electric Power Research Institute，EPRI)智能电网建设评价指标体系[15]，由于美国电网设施老化陈旧，安全稳定隐患较为突出，美国的评价指标重点关注网架与设备的可靠性。我国已在传统电力系统[16-18]、能源互联网[19-21]、智能电网[22-26]的评价指标体系研究方面积累了一定经验和成果，其中国家电网公司围绕清洁低碳、安全可靠、泛在互联、高效互动、智能开放等能源互联网特征，提出了包含 17 个特性指标的能源互联网发展水平评价指标体系，为本文新型电力系统发展水平评价指标的选取提供了一定参考价值。自我国提出构建新型电力系统战略目标以来，研究人员已在新型电力系统评价指标体系构建方面开展了初步探索，文献[27]从绿色清洁、安全可靠和经济高效 3 个维度构建了新型电力系统低碳电网效益评价指标体系；文献[28]从经济性、可靠性、能源利用、技术性和环保性 5 个角度提出了新型电力系统源网荷储协同发展综合评价指标体系；文献[29]提出了以清洁低碳、安全可靠、灵活智能、开放互动和经济高效为核心的新型电力系统指标体系，但上述指标体系均较为庞杂，部分指标所对应的数据获取困难，不利于后续评价工作的开展。在综合评价方法研究方面，已有方法主要通过对评价指标进行加权计算得到评价结果，目前应用较多的指标定权方法主要包括模糊层次分析法[30-33]、主成分聚类分析法[34-36]、优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS)和灰色关联分析法[37-39]等。但基于指标权重的综合评价方法在评价不同能源禀赋及电网结构的新型电力系统时，难以灵活调整各项指标的权重系数，导致不同类型新型电力系统的发展特色难以在评价结果中体现，评价方法的适用性有所下降。

本文基于新型电力系统基本特征，构建了包含核心指标和创新指标的新型电力系统发展水平评价指标体系，提出了基于指标水平分级的新型电力系统发展水平综合评价方法。本文所提的新型电力系统发展水平指标体系及综合评价方法可以量化评估新型电力系统的建设成效，明晰新型电力系统建设的薄弱环节和存在问题，为后期新型电力系统的重点规划和建设提供决策意见，有利于推进我国新型电力系统的建设进程。

1　新型电力系统发展水平评价指标体系构建

1.1　新型电力系统基本特征

2023 年 7 月，中央全面深化改革委员会第二次会议指出“要加快构建清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统”，阐明了新型电力系统的基本特征[40]。清洁低碳，即形成清洁主导、电为中心的能源供给和消费体系；安全充裕，即加强支撑性和调节性电源建设，电力供应和调节能力充裕；经济高效，即提升电力系统整体运行效率；供需协同，即推动多形态、多要素、多主体协调互动、动态平衡；灵活智能，即实现电力系统数字化、网络化、智慧化[41]。因此在新型电力系统发展水平评价指标体系构建时，评价指标应集中体现新型电力系统“清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能”的五大基本特征。

1.2　新型电力系统发展水平评价指标体系

新型电力系统发展水平评价指标体系如图 1 所示。为了便于后续评价工作的开展，在进行指标选择时，应选取可量化、可分级且统计数据较易获取的指标；同时评价指标应符合新型电力系统的发展趋势，将新型电力系统中新政策、新技术相关的指标纳入评价范围。基于新型电力系统的五大基本特

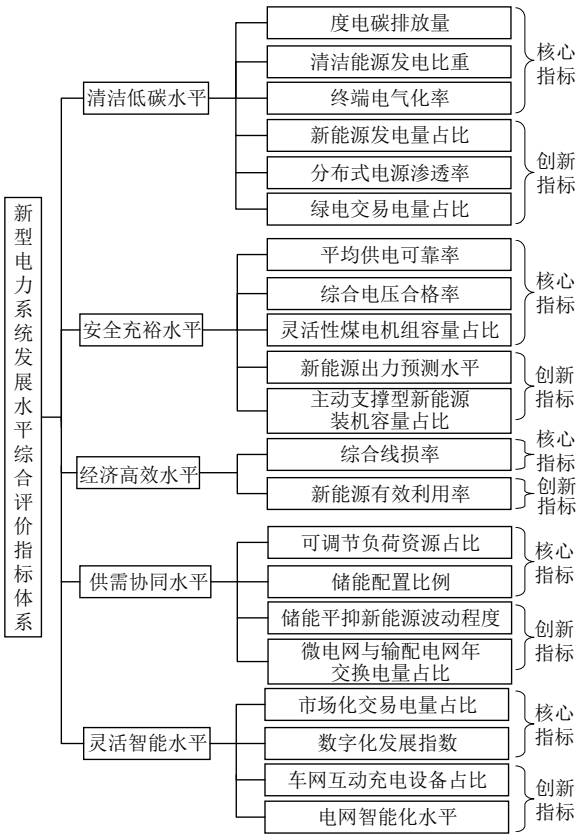

图 1　新型电力系统发展水平评价指标体系

Fig. 1　Evaluation index system of development level of new power system

征，设置清洁低碳水平、安全充裕水平、经济高效水平、供需协同水平、灵活智能水平共 5 项一级指标，一级指标下共设置 21 项二级指标，二级指标覆盖新型电力系统源网荷储碳数[42]等关键要素，且集中体现新型电力系统的基本特征。1）清洁低碳水平包括度电碳排放量、清洁能源发电比重、终端电气化率、新能源发电量占比、分布式电源渗透率、绿电交易电量占比共 6 项二级指标。度电碳排放量和绿电交易电量占比指标集中体现新型电力系统能源供给侧的低碳化水平；清洁能源发电比重、新能源发电量占比、分布式电源渗透率指标体现新型电力系统能源供给侧的清洁化和多元化水平；终端电气化率则体现系统在能源消费侧的电气化程度。2）安全充裕水平包括平均供电可靠率、综合电压合格率、灵活性煤电机组容量占比、新能源出力预测水平、主动支撑型新能源装机容量占比共 5 项二级指标。平均供电可靠率和综合电压合格率作为目前电网企业供电质量评估的两个重要指标，是新型电力系统安全充裕水平评价的基础；灵活性煤电机组容量占比反映调节性电源的建设成效；主动支撑型新能源装机容量占比体现新能源对大电网安全稳定的支撑能力；新能源出力预测水平指标则体现系统对高比例新能源接入的调度管控能力。3）经济高效水平包括综合线损率和新能源有效利用率两个二级指标，其中综合线损率是衡量电网运行管理水平的一项重要指标，新能源有效利用率则体现系统高效消纳新能源的能力。4）供需协同水平包括可调节负荷资源占比、储能配置比例、储能平抑新能源波动程度、微电网与输配电网年交换电量占比 4 项二级指标，其中可调节负荷资源占比体现负荷侧的需求响应潜力，储能配置比例及储能平抑新能源波动程度体现储能对新型电力系统调节能力提升的贡献程度，微电网与输配电网年交换电量占比则体现系统中微电网的规划运行水平。5）灵活智能水平包括市场化交易电量占比、数字化发展指数、车网互动充电设备占比、电网智能化水平 4 项二级指标。市场化交易电量占比反映出电力市场的建设成效，同时也是新型电力系统数字化、网络化的重要体现；数字化发展指数则是电力企业负责人考核的重要指标，反映新型电力系统的数字化程度；车网互动充电设备占比和电网智能化水平则集中体现新型电力系统的智慧化水平。

在指标体系的基础上，根据指标的适用性，将二级指标分为核心指标和创新指标两类。核心指标具有普适性，适用于不同规模、不同能源禀赋和电网结构的新型电力系统发展水平评价，即无论被评价新型电力系统属于自平衡系统、送端系统还是受端系统，无论其处于能源富集还是能源匮乏型地区，在进行新型电力系统发展水平评价时，都需纳入评价范围的指标；创新指标则具有针对性，不同类型的新型电力系统可基于自身能源禀赋、电网结构、建设目标等选择不同的创新指标进行评价，评价结果作为核心指标评价结果的补充，从而在综合评价结果中体现不同类型新型电力系统的建设特色。二级指标的分类情况如图 1 所示。

2 评价指标定义与计算

2.1 清洁低碳水平

2.1.1 度电碳排放量

该指标为核心指标，指标释义为每消费 1kW·h 电所对应的温室气体排放量，指标计算方法[43]见式(1)—(3)。

$$F_n' = Q_{\text{carbon},n} / E_n \tag{1}$$

$$F_j = \frac{F_{m,j}'(E_j - E_{\text{Green},j})}{E_j} \tag{2}$$

$$F_n = \frac{Q_{\text{carbon},n} + (\sum_J F_{m,j}' E_{\text{Green},j})(E_n / E_{ns})}{E_n} \tag{3}$$

式中：F_n 为电力系统度电碳排放量，F_n' 为电力系统不考虑绿电交易时的初始度电碳排放量，F_j 为电力系统中绿电用户 j 的度电碳排放量，$F_{m,j}'$ 为向绿电用户 j 供电的电力系统的初始度电碳排放量，计量单位均为 $kgCO_2/(kW·h)$；$Q_{\text{carbon},n}$ 为不考虑绿电交易时电力系统的间接碳排放量，计量单位为 tCO_2；E_n 为电力系统用电量，E_{ns} 为全国电力系统总用电量，E_j 为绿电用户 j 的用电量，$E_{\text{Green},j}$ 为绿电用户 j 购买的绿电电量，计量单位均为 MW·h；J 为电力系统中购买绿电的用户总数。

2.1.2 清洁能源发电比重

该指标为核心指标，指标释义为水电、核电、新能源等清洁能源发电量占总发电量的百分比，适用于评价各类型新型电力系统的电源侧清洁化水平。指标计算方法见式(4)。

$$R_{\text{clean}} = \frac{E_{\text{clean}}}{E_{\text{sum}}} \times 100\% \tag{4}$$

式中：R_{clean} 为清洁能源发电比重，计量单位为%；E_{clean} 为清洁能源发电量，E_{sum} 为总发电量，计量单位均为 kW·h。

2.1.3 终端电气化率

该指标为核心指标，指标释义为电能占终端能

源消费的百分比，指标计算方法见式(5)。

$$R_{\mathrm{E}}=\frac{W_{\mathrm{E}}}{W_{\mathrm{sum}}}\times 100\% \tag{5}$$

式中：R_{E} 为终端电气化率，计量单位为%；W_{E} 为终端电能消费量，W_{sum} 为终端能源总消费量，计量单位均为 kW·h。

2.1.4　新能源发电量占比

该指标为创新指标，指标释义为新能源发电量占总发电量的百分比，适用于评价新能源富集地区新型电力系统的新能源开发利用水平。指标计算方法见式(6)。

$$R_{\mathrm{N}}=\frac{E_{\mathrm{N}}}{E_{\mathrm{sum}}}\times 100\% \tag{6}$$

式中：R_{N} 为新能源发电量占比，计量单位为%；E_{N} 为新能源发电量，E_{sum} 为总发电量，计量单位均为 kW·h。

2.1.5　分布式电源渗透率

该指标为创新指标，指标释义为分布式电源装机容量占年最大负荷的百分比，其中分布式电源指接入 35kV 及以下电压等级电网、位于用户附近、在 35kV 及以下电压等级就地消纳为主的电源。指标计算方法见式(7)。

$$R_{\mathrm{distributed}}=\frac{P_{\mathrm{distributed}}}{P_{\mathrm{max}}}\times 100\% \tag{7}$$

式中：$R_{\mathrm{distributed}}$ 为分布式电源渗透率，计量单位为%；$P_{\mathrm{distributed}}$ 为分布式电源装机容量，P_{max} 为年最大负荷，计量单位均为 MW。

2.1.6　绿电交易电量占比

该指标为创新指标，指标释义为电力系统内参与绿电交易的电量占市场化交易电量的百分比。绿电交易即绿色电力交易，根据国家电网公司、南方电网公司制定的《绿色电力交易试点工作方案》，绿色电力交易是以绿色电力产品为标的物开展的电力中长期交易，其中绿色电力产品初期为风电和光伏发电企业上网电量，条件成熟时扩大至符合条件的水电。指标计算方法见式(8)。

$$R_{\mathrm{green}}=\frac{E_{\mathrm{green}}}{E_{\mathrm{c}}}\times 100\% \tag{8}$$

式中：R_{green} 为绿电交易电量占比，计量单位为%；E_{green} 为参与绿电交易的电量，E_{c} 为参与市场化交易的电量，计量单位均为 kW·h。

2.2　安全充裕水平

2.2.1　平均供电可靠率

该指标为核心指标，指标释义为统计期间内对用户有效供电时间小时数占统计期间小时数的百分比，指标计算方法见式(9)。

$$R_{\mathrm{reliability}}=1-\frac{t_{\mathrm{blackout}}}{N_{\mathrm{hour}}} \tag{9}$$

式中：$R_{\mathrm{reliability}}$ 为平均供电可靠率，计量单位为%；t_{blackout} 为系统平均停电时间，计量单位为小时/户；N_{hour} 为统计期间时间，计量单位为 h。

2.2.2　综合电压合格率

该指标为核心指标，指标释义为实际运行电压偏差在限值范围内累计运行时间与对应的总运行统计时间的百分比，指标计算方法[44]见式(10)(11)。

$$R_{\mathrm{U}_i}=(1-\frac{t_{\mathrm{up}}+t_{\mathrm{low}}}{t})\times 100\% \tag{10}$$

$$R_{\mathrm{U}}=0.5\times R_{\mathrm{U_A}}+0.5\times\frac{R_{\mathrm{U_B}}+R_{\mathrm{U_C}}+R_{\mathrm{U_D}}}{3} \tag{11}$$

式中：R_{U} 为综合电压合格率，计量单位为%；$R_{\mathrm{U}i}$ 为监测点电压合格率，分为 A、B、C、D 四类监测点，R_{UA} 为 A 类监测点合格率，R_{UB} 为 B 类监测点合格率，R_{UC} 为 C 类监测点合格率，R_{UD} 为 D 类监测点合格率，计量单位均为%；t_{up} 为电压超上限时间，t_{low} 为电压超下限时间，t 为总运行统计时间，计量单位均为 h。

2.2.3　灵活性煤电机组容量占比

该指标为核心指标，指标释义为灵活性煤电机组容量占所有煤电机组容量的百分比。根据国家发展改革委、国家能源局发布的《全国煤电机组改造升级实施方案》，灵活性煤电机组指在纯凝工况下最小发电出力达到 35%额定负荷，或在供热工况下通过热电解耦实现单日 6h 最小发电出力达到 40%额定负荷调峰能力的煤电机组。指标计算方法见式(12)。

$$R_{\mathrm{flexible}}=\frac{P_{\mathrm{flexible}}}{P_{\mathrm{thermal}}}\times 100\% \tag{12}$$

式中：R_{flexible} 为灵活性煤电机组容量占比，计量单位为%；P_{flexible} 为灵活性煤电机组装机容量，P_{thermal} 为所有煤电机组装机容量，计量单位均为 MW。

2.2.4　新能源出力预测水平

该指标为创新指标，指标释义为新能源短期出力预测和中长期出力预测水平的平均值，指标计算方法见式(13)。

$$L_{\mathrm{forecast}}=M_{\mathrm{APE}}(P_{\mathrm{fs}},P_{\mathrm{rs}})\times 50\%+M_{\mathrm{APE}}(P_{\mathrm{fl}},P_{\mathrm{rl}})\times 50\% \tag{13}$$

式中：L_{forecast} 为新能源出力预测水平，计量单位为%；$M_{\mathrm{APE}}(P_{\mathrm{fs}}, P_{\mathrm{rs}})$为小时级和分钟级新能源发电的预测值和实际值两者之间的平均绝对百分比误差，$M_{\mathrm{APE}}(P_{\mathrm{fl}}, P_{\mathrm{rl}})$为日、周、月、季度、年时间尺度下新

能源发电的预测值和实际值两者之间的平均绝对百分比误差，计量单位均为%；P_{fs} 为小时级和分钟级新能源发电预测值，P_{rs} 为小时级和分钟级新能源发电实际值，P_{fl} 为日、周、月、季度、年时间尺度下新能源发电预测值，P_{rl} 为日、周、月、季度、年时间尺度下新能源发电实际值，计量单位均为MW。

2.2.5 主动支撑型新能源装机容量占比

该指标为创新指标，指标释义为主动支撑型新能源装机容量占新能源总装机容量的百分比，其中主动支撑型新能源指外特性模拟同步发电机特性，可以支撑电力系统电压、频率稳定并提供备用容量的新能源。在构建新型电力系统目标的指引下，新能源发电装机规模将大幅增长，新能源将从提供电量补充逐步成为提供电量支撑的主体电源，但高比例新能源将导致电力系统转动惯量不足，系统频率调节能力显著下降，新能源主动支撑技术对于新型电力系统安全稳定运行意义重大。将主动支撑型新能源装机容量占比设置为创新指标，一方面可评估我国新能源主动支撑技术的发展进程，另一方面可鼓励各地积极参与推动新能源主动支撑技术示范应用。指标计算方法见式(14)。

$$R_{\text{support}}=\frac{P_{\text{support}}}{P_{\text{N}}}\times 100\% \tag{14}$$

式中：R_{support} 为主动支撑型新能源装机容量占比，计量单位为%；P_{support} 为主动支撑型新能源装机容量，P_{N} 为新能源总装机容量，计量单位均为MW。

2.3 经济高效水平

2.3.1 综合线损率

该指标为核心指标，指标释义为电力系统损失电量占供电量的百分比，指标计算方法见式(15)。

$$R_{\text{LOSS}}=\frac{E_{\text{SU}}-E_{\text{SA}}}{E_{\text{SU}}}\times 100\% \tag{15}$$

式中：R_{LOSS} 为综合线损率，计量单位为%；E_{SU} 为供电量，E_{SA} 为售电量，计量单位均为kW·h。

2.3.2 新能源有效利用率

该指标为创新指标，指标释义为新能源消纳电量占新能源总发电量的百分比，指标计算方法见式(16)。

$$\eta_{\text{N}}=\frac{E_{\text{Nc}}}{E_{\text{Nsum}}}\times 100\% \tag{16}$$

式中：η_{N} 为新能源有效利用率，计量单位为%；E_{Nc} 为新能源消纳电量，E_{Nsum} 为新能源总发电量，计量单位均为kW·h。

2.4 供需协同水平

2.4.1 可调节负荷资源占比

该指标为核心指标，指标释义为可调节负荷资源总量占年最大负荷的百分比，指标计算方法见式(17)。

$$R_{\text{load}}=\frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{max}}}\times 100\% \tag{17}$$

式中：R_{load} 为可调节负荷资源占比，计量单位为%；P_{load} 为可调节负荷资源总量，P_{max} 为年最大负荷，计量单位为MW。

2.4.2 储能配置比例

该指标为核心指标，指标释义为储能功率总值占总发电装机容量的百分比。其中储能功率总值即抽水蓄能和新型储能的总装机容量，新型储能具体包括电化学储能、压缩空气储能、飞轮储能、重力储能、热储能、氢储能、超级电容器储能等。指标计算方法见式(18)。

$$R_{\text{ES}}=\frac{P_{\text{ES}}}{P_{\text{sum}}}\times 100\% \tag{18}$$

式中：R_{ES} 为储能配置比例，计量单位为%；P_{ES} 为储能功率总值，P_{sum} 为总发电装机容量，计量单位均为MW。

2.4.3 储能平抑新能源波动程度

该指标为创新指标，指标释义为投入储能系统前后，新能源小时级最大功率波动绝对值之差占新能源总装机容量的百分比，指标计算方法见式(19)。

$$D_{\text{N}}=\frac{|\Delta P_{\text{N}}|-|\Delta P_{\text{N,ES}}|}{P_{\text{N}}}\times 100\% \tag{19}$$

式中：D_{N} 为储能平抑新能源波动程度，计量单位为%；ΔP_{N} 为投入储能系统前新能源小时级最大功率波动值，$\Delta P_{\text{N,ES}}$ 为投入储能系统后新能源小时级最大功率波动值，P_{N} 为新能源总装机容量，计量单位均为MW。

2.4.4 微电网与输配电网年交换电量占比

该指标为创新指标，指标释义为微电网与输配电网的年交换电量占微电网年用电量的百分比，指标计算方法见式(20)。

$$R_{\text{exchange}}=\frac{E_{\text{exchange}}}{E_{\text{M}}}\times 100\% \tag{20}$$

式中：R_{exchange} 为微电网与输配电网年交换电量占比，计量单位为%；E_{exchange} 为微电网与输配电网的年交换电量，E_{M} 为微电网年用电量，计量单位均为kW·h。

2.5 灵活智能水平

2.5.1 市场化交易电量占比

该指标为核心指标，指标释义为进行市场化交

易的电量占总发电量的百分比，指标计算方法见式(21)。

$$R_{\mathrm{m}}=\frac{E_{\mathrm{c}}}{E_{\mathrm{sum}}}\times 100\% \tag{21}$$

式中：R_{m} 为市场化交易电量占比，计量单位为%；E_{c} 为参与市场竞争交易的电量，E_{sum} 为总发电量，计量单位均为 kW·h。

2.5.2　数字化发展指数

该指标为核心指标，指标释义为电力企业设备联网率、产业数字化率、数字产业化率、产业带动系数的综合平均值，指标计算方法见式(22)。

$$I_{\mathrm{d}}=C_{\mathrm{inf}}\times 25\%+R_{\mathrm{ind}}\times 0.25\%+R_{\mathrm{dig}}\times 0.25\%+C_{\mathrm{driv}}\times 25\% \tag{22}$$

式中：I_{d} 为数字化发展指数，计量单位为%；C_{inf} 为设备联网率，即已联网设备数量占企业在运设备数量的比重，计量单位为%；R_{ind} 为产业数字化率，即线上化业务流程数量占企业业务流程数量总数的比重，计量单位为%；R_{dig} 为数字产业化率，即企业数字产业利润占总利润的比重，计量单位为%；C_{driv} 为产业带动系数，即企业生态上下游企业创造的数字经济产业规模总值与企业数字经济产业规模总值的比重，计量单位为%。

2.5.3　车网互动充电设备占比

该指标为创新指标，指标释义为可以实现车网互动的充电设备数量占充电设备总量的百分比。根据南方电网公司和中国电力企业联合会联合发布的《车网互动规模化应用与发展白皮书》，车网互动是指电动汽车通过充电桩与电网进行能量和信息的互动，通常情况下可按能量流向分为有序充电和双向充放电。车网互动充电设备指可以实现车网互动的电动汽车充电桩，具体包括公共充电桩和可以联网的私人充电桩两大类。指标计算方法见式(23)。

$$R_{\mathrm{interacetion}}=\frac{N_{\mathrm{interaction}}}{N_{\mathrm{charging}}}\times 100\% \tag{23}$$

式中：$R_{\mathrm{interaction}}$ 为车网互动充电设备占比，计量单位为%；$N_{\mathrm{interaction}}$ 为可以实现车网互动的充电设备数量，N_{charging} 为充电设备总量，计量单位均为个。

2.5.4　电网智能化水平

该指标为创新指标，指标释义为电网配电自动化覆盖率、智能电表覆盖率、变电站智能化率、输电线路智能化率的综合平均值，指标计算方法见式(24)。

$$L_{\mathrm{intelligence}}=R_{\mathrm{auto}}\times 25\%+R_{\mathrm{meter}}\times 25\%+R_{\mathrm{sub}}\times 25\%+R_{\mathrm{line}}\times 25\% \tag{24}$$

式中：$L_{\mathrm{intelligence}}$ 为电网智能化水平，计量单位为%；R_{auto} 为配电自动化覆盖率，即配置配电自动化终端的配电网线路条数占配电网线路总条数的比例，计量单位为%；R_{meter} 为智能电表覆盖率，即电网结算计量点安装的智能电表数占结算计量点电表总数的比例，计量单位为%；R_{sub} 为变电站智能化率，即智能变电站数量占变电站总数的比例，计量单位为%；R_{line} 为输电线路智能化率，即应用智能巡检、运维技术的输电线路占输电线路总条数的比例，计量单位为%。

3　新型电力系统发展水平综合评价方法

3.1　评价指标水平分级

根据我国新型电力系统规划及发展情况，将核心指标数值分为先进水平、平均水平、基准水平 3 个等级，其中先进水平按照我国省级新型电力系统中前 20%达到的水平取值，平均水平按照我国新型电力系统发展的平均水平取值，基准水平按照我国省级新型电力系统中前 50%~70%达到的水平取值；创新指标不划分等级，以我国新型电力系统发展的平均水平取值。通过调研我国各省新型电力系统各评价指标数值情况，得到表 1 所示的新型电力系统发展水平评价指标水平分级情况表，指标水平分级情况可根据政府部门或权威机构发布的统计数据进行动态调整。

3.2　基于指标水平分级的新型电力系统发展水平综合评价方法

根据被评价新型电力系统各项评价指标的数值，确定各项核心指标所处等级以及达到评价要求的创新指标项数，根据表 2 所示的评价方法将新型电力系统发展水平综合评价结果划分为一级至四级。当被评价新型电力系统的核心指标数值均达到对应指标的先进水平要求，且创新指标要求至少达到 1 项时，新型电力系统发展水平综合评价结果为一级；当被评价新型电力系统核心指标数值均达到对应指标的平均水平要求时，新型电力系统发展水平评价结果为二级；当被评价新型电力系统核心指标数值均达到基准水平要求时，新型电力系统发展水平评价结果为三级；当被评价新型电力系统核心指标数值未全部达到基准水平要求时，新型电力系统发展水平评价结果为四级。基于指标水平分级的新型电力系统发展水平综合评价方法流程图如图 2 所示。与基于指标权重的分数制评价方法相比，等级制的评价方法在充分考虑具有普适性的核心指标的评价结果的同时，还可将不同新型电力系统的

表 1　新型电力系统发展水平评价指标水平分级

Table 1　Level classification of evaluation index of development level of new power system

指标类型	评价指标		指标水平分级		
	一级指标	二级指标	先进水平	平均水平	基准水平
核心指标	清洁低碳水平	度电碳排放量/(kgCO_2/(kW·h))	≤0.4562	≤0.5703	≤0.6844
		清洁能源发电比重/%	≥40	≥34	≥25
		终端电气化率/%	≥30	≥26.9	≥20
	安全充裕水平	平均供电可靠率/%	≥99.964	≥99.896	≥99.726
		综合电压合格率/%	≥99.99	≥99.86	≥97.00
		灵活性煤电机组容量占比/%	≥16.2	≥9	≥6
	经济高效水平	综合线损率/%	≤4.5	≤4.84	≤6
	供需协同水平	可调节负荷资源占比/%	≥5	≥3	≥1
		储能配置比例/%	≥3	≥2	≥1
	灵活智能水平	市场化交易电量占比/%	≥60	≥55	≥45
		数字化发展指数/%	≥65	≥63	≥55
创新指标	清洁低碳水平	新能源发电量占比/%		≥14	
		分布式电源渗透率/%		≥12.2	
		绿电交易电量占比/%		≥0.36	
	安全充裕水平	新能源出力预测水平/%		≥92.5	
		主动支撑型新能源装机容量占比/%		≥1	
	经济高效水平	新能源有效利用率/%		≥97.3	
	供需协同水平	储能平抑新能源波动程度/%		≥5	
		微电网与输配电网年交换电量占比/%		≤50	
	灵活智能水平	车网互动充电设备占比/%		≥10	
		电网智能化水平/%		≥85	

表 2　新型电力系统发展水平综合评价方法

Table 2　Comprehensive evaluation method of development level of new power system

评价等级		满足条件
一级	核心指标均达到先进水平要求	创新指标要求至少达到 1 项
二级	核心指标均达到平均水平要求	—
三级	核心指标均达到基准水平要求	—
四级	核心指标未均达到基准水平要求	—

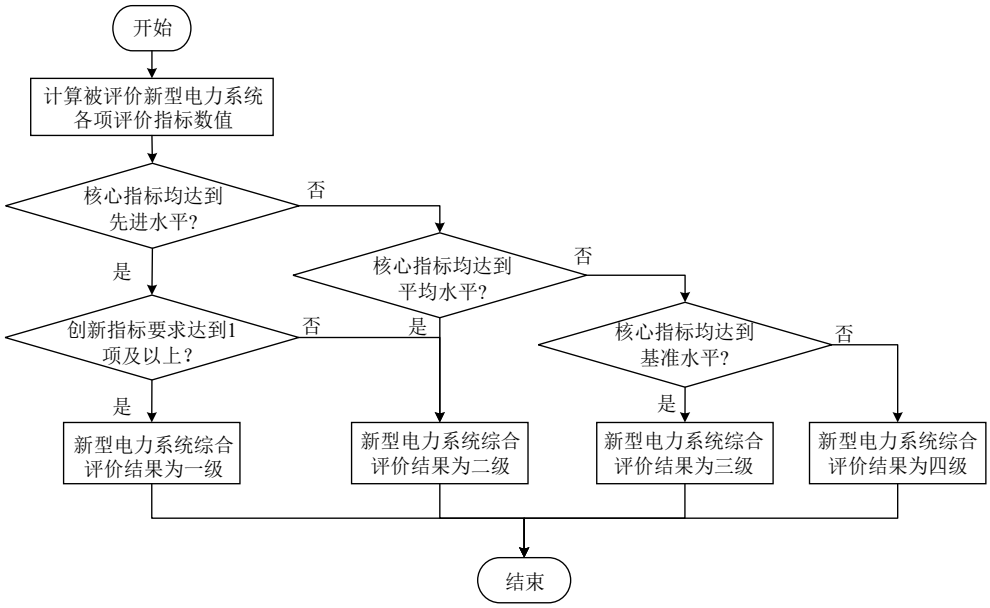

图 2　新型电力系统发展水平综合评价方法流程图

Fig. 2　Flow chart of comprehensive evaluation method of development level of new power system

发展特色纳入评价范围，更符合我国目前新型电力系统发展方向及建设目标尚未完全统一的基本现状，从而使得评价结果更加全面。

3.3　评价实例

3.3.1　评价对象基本情况

以我国某三省(A 省、B 省、C 省)新型电力系

统为实例，开展新型电力系统发展水平综合评价。A 省清洁能源品类丰富，具有一定的能源挖掘潜力，为自平衡电力系统；B 省化石能源匮乏，外来电占比高，为典型受端电力系统；C 省清洁能源富集，为典型送端电力系统。

3.3.2　评价结果与分析

表 3 所示为 A、B、C 省新型电力系统发展水平评价指标的数值情况。根据表 1 中新型电力系统发展水平评价指标水平分级方法得到表 4 所示的省级新型电力系统发展水平综合评价表，其中 A 省新型电力系统核心指标共有 8 项达到先进水平，2 项达到平均水平，1 项达到基准水平；B 省新型电力系统核心指标共有 9 项达到先进水平，2 项达到平均水平；C 省共有 8 项达到先进水平，3 项达到基准水平。根据表 2 所示的新型电力系统发展水平综合评价方法，A 省和 C 省电力系统发展水平核心指标均达到基准水平要求，发展水平评价等级为三级；B 省新型电力系统核心指标均达到平均水平要求，发展水平评价等级为二级。由于 A、B、C 省核心指标未均达到先进水平要求，此时暂不考虑创新指标的评价结果。

表 3　省级新型电力系统发展水平评价指标数值

Table 3　Value of evaluation index of development level of provincial new power systems

核心指标及单位		指标结果		
一级指标	二级指标	A 省	B 省	C 省
清洁低碳水平	度电碳排放量/($kgCO_2$/(kW·h))	0.489	0.532	0.095
	清洁能源发电比重/%	50	40	85
	终端电气化率/%	32.6	36.9	31.6
安全充裕水平	平均供电可靠率/%	99.942	99.978	99.810
	综合电压合格率/%	99.996	99.974	99.500
	灵活性煤电机组容量占比/%	100	64	80
经济高效水平	综合线损率/%	3.60	3.67	3.89
供需协同水平	可调节负荷资源占比/%	5	5	5
	储能配置比例/%	1.64	5.73	1.09
灵活智能水平	市场化交易电量占比/%	65.4	67.0	87.7
	数字化发展指数/%	75	66	65

表 4　省级新型电力系统发展水平综合评价

Table 4　Comprehensive evaluation of development level of provincial new power systems

核心指标名称		核心指标结果		
一级指标	二级指标	A 省	B 省	C 省
清洁低碳水平	度电碳排放量	平均水平	平均水平	先进水平
	清洁能源发电比重	先进水平	先进水平	先进水平
	终端电气化率	先进水平	先进水平	先进水平
安全充裕水平	平均供电可靠率	平均水平	先进水平	基准水平
	综合电压合格率	先进水平	平均水平	基准水平
	灵活性煤电机组容量占比	先进水平	先进水平	先进水平
经济高效水平	综合线损率	先进水平	先进水平	先进水平
供需协同水平	可调节负荷资源占比	先进水平	先进水平	先进水平
	储能配置比例	基准水平	先进水平	基准水平
灵活智能水平	市场化交易电量占比	先进水平	先进水平	先进水平
	数字化发展指数	先进水平	先进水平	先进水平

根据二级指标的水平分级情况得到图 3、图 4、图 5 所示的 A、B、C 省新型电力系统发展水平综合评价示意图。可见，在清洁低碳水平方面，C 省新型电力系统由于清洁能源富集，相比 A、B 两省具有一定优势；在安全充裕水平方面，三省新型电力系统均相对薄弱，反映出我国新型电力系统建设在电力安全稳定供应能力提升方面仍存在不足；在经济高效水平和灵活智能水平方面，三省新型电力

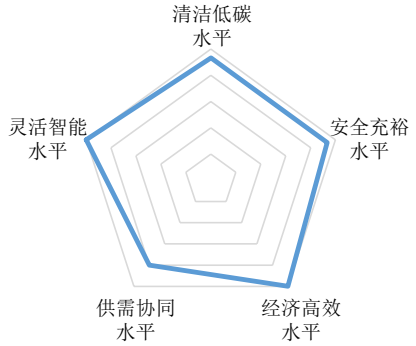

图 3　A 省新型电力系统发展水平综合评价

Fig. 3　Comprehensive evaluation of development level of new power system of province A

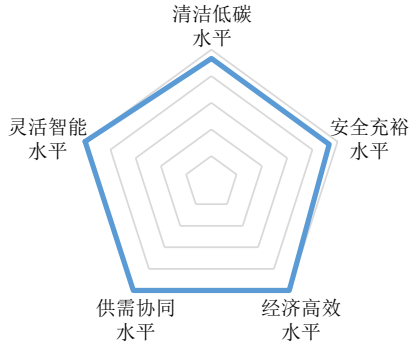

图 4　B 省新型电力系统发展水平综合评价

Fig. 4　Comprehensive evaluation of development level of new power system of province B

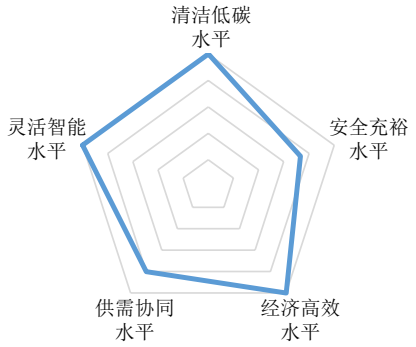

图 5　C 省新型电力系统发展水平综合评价

Fig. 5　Comprehensive evaluation of development level of new power system of province C

系统建设成效显著，均已达到国内先进水平；在供需协同水平方面，B 省新型电力系统发展水平最高，相关技术和政策机制可为 A、C 两省提供经验参考。从 5 个维度综合来看，B 省新型电力系统发展最为均衡，综合评价等级最高；A 省与 C 省新型电力系统虽综合评价等级相同，但 A 省新型电力系统发展更为均衡，后期发展潜力相对更大。

从表 4 中具体指标的评价结果来看，B 省在后期新型电力系统建设中应进一步调整电源结构，推动电力系统低碳转型，并加强对电能质量的管理；A 省目前仅有储能配置比例一项指标未达到平均水平要求，导致评价等级偏低，因此 A 省在后期新型电力系统建设中应重点加强对储能设备的规划布局，进一步提升系统的供需协同水平，同时还应重视电力系统低碳转型和供电可靠性的提升；C 省则应重点提升系统的安全充裕水平，优化网架结构，加强支撑性、调节性电源建设，保障电力安全稳定供应。

综上所述，本文提出的新型电力系统发展水平综合评价方法不仅能评价出新型电力系统发展水平所处等级，还能基于具体评价指标的水平分级情况针对性地提出规划建设意见，对于我国新型电力系统高水平发展具有促进作用。

4 结论

对新型电力系统发展水平进行科学、合理的评价对于新型电力系统规划建设具有重要意义。本文基于新型电力系统“清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能”五大基本特征，构建了包含核心指标和创新指标的新型电力系统发展水平评价指标体系，提出了基于指标水平分级的新型电力系统发展水平综合评价方法，相关成果已应用于 2023 年 12 月发布的团体标准《质量分级及“领跑者”评价要求新型电力系统》(T/CECA-G 0272—2023)中。本文所提指标体系及评价方法适用于不同能源禀赋与电网结构的新型电力系统发展水平评价，可以量化评估新型电力系统的建设成效，明确新型系统发展水平所处等级，为后期新型电力系统的重点规划和建设提供决策意见，有利于推进我国新型电力系统的建设进程。

参考文献

[1] 张智刚，康重庆．碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]．中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818．
ZHANG Zhigang，KANG Chongqing．Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]．Proceedings of the CSEE，2022，42(8)：2806-2818(in Chinese)．

[2] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等．双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]．高电压技术，2021，47(9)：3036-3046．
HAN Xiaoqing，LI Tingjun，ZHANG Dongxia，et al．New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]．High Voltage Engineering，2021，47(9)：3036-3046(in Chinese)．

[3] 黎博，陈民铀，钟海旺，等．高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]．中国电机工程学报，2023，43(2)：555-580．
LI Bo，CHEN Minyou，ZHONG Haiwang，et al．A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]．Proceedings of the CSEE，2023，43(2)：555-580(in Chinese)．

[4] 韩凝晖，周颖，石坤，等．面向新型电力系统电量平衡的可调节负荷互动潜力分析[J]．电力需求侧管理，2022，24(6)：70-76．
HAN Ninghui，ZHOU Ying，SHI Kun，et al．Adjustable load interaction potential oriented to power balance of new power system [J]．Power Demand Side Management，2022，24(6)：70-76(in Chinese)．

[5] 谢小荣，马宁嘉，刘威，等．新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]．中国电机工程学报，2023，43(1)：158-168．
XIE Xiaorong，MA Ningjia，LIU Wei，et al．Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems：review and prospect[J]．Proceedings of the CSEE，2023，43(1)：158-168(in Chinese)．

[6] 刘钊汛，秦亮，杨诗琦，等．面向新型电力系统的电力电子变流器虚拟同步控制方法评述[J]．电网技术，2023，47(1)：1-15．
LIU Zhaoxun，QIN Liang，YANG Shiqi，et al．Review on virtual synchronous generator control technology of power electronic converter in power system based on new energy[J]．Power System Technology，2023，47(1)：1-15(in Chinese)．

[7] 江秀臣，许永鹏，李曜丞，等．新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]．高电压技术，2022，48(1)：1-10．
JIANG Xiuchen，XU Yongpeng，LI Yaocheng，et al．Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of new power system[J]．High Voltage Engineering，2022，48(1)：1-10(in Chinese)．

[8] 王睿琛，蔡娜，高航，等．面向新型电力系统的电力市场主体统一身份模型设计及应用[J]．电网技术，2022，46(11)：4160-4168．
WANG Ruichen，CAI Na，GAO Hang，et al．Design and application of unified identity model for power market subjects of novel power systems[J]．Power System Technology，2022，46(11)：4160-4168(in Chinese)．

[9] 孙强，葛旭波，刘林，等．国内外智能电网评价体系对比分析[J]．电力系统及其自动化学报，2011，23(6)：105-110．
SUN Qiang，GE Xubo，LIU Lin，et al．Review of smart grid comprehensive assessment systems[J]．Proceedings of the CSU-EPSA，2011，23(6)：105-110(in Chinese)．

[10] 郝露茜，吴军，王智冬，等．电力系统源-网-荷-储协调水平综合评价方法研究[J]．智慧电力，2021，49(3)：12-18．
HAO Luxi，WU Jun，WANG Zhidong，et al．Research on comprehensive evaluation method of source-grid-load-storage coordination level in power system[J]．Smart Power，2021，49(3)：12-18(in Chinese)．

[11] ENTSO-E，EDSO．The European electricity grid initiative(EEGI)：roadmap 2010-18 and detailed implementation Plan 2010-12[EB/OL]．[2024-01-01]．https://ec.europa.eu/research/participants/portal4/doc/call/fp7/fp7-energy-2012-1-2stage/31278-eegi_implementation_plan_may_2010_en.pdf．

[12] European Smart Grids Technology Platform. Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future[R]. Brussels: European Commission, 2010.

[13] U.S. Department of Energy. Smart grid system report[R]. New York: U.S. Department of Energy, 2009.

[14] DOE. DOE smart grid system report -annex A and B[R]. New York: U.S. Department of Energy, 2009.

[15] Electric Power Research Institute. Methodological approach for estimating the benefits and costs of smart grid demonstration projects[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2010.

[16] 卢锦玲，张津，丁茂生．含风电的电力系统调度经济性评价[J]．电网技术，2016，40(8)：2258-2264．
LU Jinling, ZHANG Jin, DING Maosheng. Economic evaluation of power system dispatch integrated with wind power[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2258-2264(in Chinese).

[17] 肖峻，崔艳妍，王建民，等．配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]．电力系统自动化，2008，32(15)：36-40．
XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianming, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40(in Chinese).

[18] 杨小彬，李和明，尹忠东，等．基于层次分析法的配电网能效指标体系[J]．电力系统自动化，2013，37(21)：146-150，195．
YANG Xiaobin, LI Heming, YIN Zhongdong, et al. Energy efficiency index system for distribution network based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 146-150, 195(in Chinese).

[19] 原凯，李敬如，宋毅，等．区域能源互联网综合评价技术综述与展望[J]．电力系统自动化，2019，43(14)：41-52，64．
YUAN Kai, LI Jingru, SONG Yi, et al. Review and prospect of comprehensive evaluation technology of regional energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 41-52, 64(in Chinese).

[20] 赵军，王妍，王丹，等．能源互联网研究进展：定义、指标与研究方法[J]．电力系统及其自动化学报，2018，30(10)：1-14．
ZHAO Jun, WANG Yan, WANG Dan, et al. Research progress in energy internet: definition, indicator and research method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(10): 1-14(in Chinese).

[21] 马君华，陆一鸣，袁文广，等．能源互联网评价体系研究[J]．中国电力，2018，51(8)：38-42．
MA Junhua, LU Yiming, YUAN Wenguang, et al. Study on the evaluation framework of the energy internet[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 38-42(in Chinese).

[22] 宫云鹏，李宏艳，于会凤．智能电网规划评价指标体系的构建及分析[J]．电力设备管理，2020(3)：42-43，58．
GONG Yunpeng, LI Hongyan, YU Huifeng. Construction and analysis of smart grid planning evaluation index system[J]. Electric Power Equipment Management, 2020(3): 42-43, 58(in Chinese).

[23] 赵良，李立理，何博，等．适合我国国情的智能电网评价指标体系及计算方法[J]．电网技术，2015，39(12)：3520-3528．
ZHAO Liang, LI Lili, HE Bo, et al. Study on smart Grid's evaluation index system and calculation method suited to China's situation[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3520-3528(in Chinese).

[24] 张健，蒲天骄，王伟，等．智能电网示范工程综合评价指标体系[J]．电网技术，2011，35(6)：5-9．
ZHANG Jian, PU Tianjiao, WANG Wei, et al. A comprehensive assessment index system for smart grid demonstration projects[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 5-9(in Chinese).

[25] 黄震，宋璇坤，刘思革，等．电网智能化发展评价指标体系及关键指标研究[J]．供用电，2016，33(2)：43-47．
HUANG Zhen, SONG Xuankun, LIU Sige, et al. Study on the evaluation index system and the key indexes of grid intelligence development[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(2): 43-47(in Chinese).

[26] 孙强，葛旭波，刘林，等．智能电网多属性网络层次组合评价法及其应用研究[J]．电网技术，2012，36(10)：49-54．
SUN Qiang, GE Xubo, LIU Lin, et al. Multi-attribute network process comprehensive evaluation method for smart grid and its application[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 49-54(in Chinese).

[27] 李志杰，汪岩．新型电力系统下低碳电网效益评价模型的构建与应用[J]．光源与照明，2023(1)：198-200．

[28] 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)：4330-4341．
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): 4330-4341(in Chinese).

[29] 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，2023：1-11[2023-12-22]．http://kns.cnki.net/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, 2023: 1-11[2023-12-22]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20231012.1633.014.html(in Chinese)

[30] 李猛，李可民，彭勃，等．基于网络层次分析法和模糊综合评判的配电网运行管理水平综合评价体系研究[J]．供用电，2019，36(8)：23-29．
LI Meng, LI Kemin, PENG Bo, et al. Research on comprehensive evaluation system of distribution network operation and management level based on ANP and fuzzy[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(8): 23-29(in Chinese).

[31] 叶保璇，王康坚，余盛达，等．计及数据时效性的输电线路状态综合评估方法[J]．广东电力，2020，33(11)：109-116．
YE Baoxuan, WANG Kangjian, YU Shengda, et al. Comprehensive evaluation method of transmission line status considering data timeliness[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(11): 109-116(in Chinese).

[32] ZHANG Liang, WANG Shudong, JIA Guangyao, et al. Smart grid risk warning based on multi-level fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1325(1): 012215.

[33] ALEXOPOULOS D K, ANASTASIADIS A G, VOKAS G A, et al. Assessment of flexibility options in electric power systems based on maturity, environmental impact and barriers using fuzzy logic method and analytic hierarchy process[J]. Energy Reports, 2023, 9(S9): 401-417.

[34] 李东东，段维伊，周波，等．基于主成分分析的电力市场供应侧主体竞争潜力指数研究[J]．电力系统保护与控制，2020，48(19)：1-8．
LI Dongdong, DUAN Weiyi, ZHOU Bo, et al. Competitive potential index of the supply side of the market entity based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 1-8(in Chinese).

[35] ZHANG Ruoyu, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Power system transient stability assessment based on principal component analysis[C]//Proceedings of the 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing: IEEE, 2018.

[36] DOMINGUEZ E X，ARBOLEYA P. Reliability assessment in photovoltaic nanogrids by means of principal components analysis [C]//Proceedings of the 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston：IEEE，2016.

[37] 吴威，唐雨晨，叶荣，等. 不同场景下基于 AHP-TOPSIS 退役电池梯次利用综合评价[J]. 电网与清洁能源，2020，36(4)：115-122.
WU Wei，TANG Yuchen，YE Rong，et al. Comprehensive evaluation of AHP-TOPSIS decommissioned battery secondary utilization in different scenarios[J]. Power System and Clean Energy，2020，36(4)：115-122(in Chinese).

[38] 闫庆友，李舟洋. 基于 TOPSIS 与灰色关联度的智能电网经济性评价研究[J]. 智能电网，2016，4(2)：179-184.
YAN Qingyou，LI Zhouyang. Assessment on economic evaluation of smart grid based on TOPSIS method and grey correlation degree analysis[J]. Smart Grid，2016，4(2)：179-184(in Chinese).

[39] CHEN Gang，HUANG Xiaoguang，SONG Huiyu，et al. TOPSIS-based comprehensive assessment method of short-term PV power prediction errors[C]//Proceedings of the 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC). Shanghai：IEEE，2023.

[40] 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).

[41] 辛保安. 一图读懂新型电力系统与新型能源体系[M]. 北京：中国电力出版社，2023.

[42] 康重庆，杜尔顺，郭鸿业，等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术，2023，47(5)：1741-1750.
KANG Chongqing，DU Ershun，GUO Hongye，et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology，2023，47(5)：1741-1750(in Chinese).

[43] 李静，李庆，苗博，等. 一种基于潮流分布的节点供电排放因子计算方法及系统：202211451495.0[P]. 2023-04-07.

[44] 中国电力企业联合会. 配电网发展水平综合评价导则：T/CEC 300—2020[S]. 北京：中国电力企业联合会，2020：3.

易俊

在线出版日期：2024-03-14。
收稿日期：2024-01-02。

作者简介：
易俊(1980)，男，博士，教授级高级工程师，研究方向为电力系统稳定分析与运行控制，E-mail：xih_yjun@163.com；
林伟芳(1983)，女，硕士，教授级高级工程师，研究方向为新型电力系统规划及运行、电力系统碳中和技术，E-mail：linwf@epri.sgcc.com.cn；
任萱(1997)，女，硕士，通信作者，助理工程师，研究方向为新型电力系统规划及运行、电力系统碳中和技术，E-mail：renxuan97@outlook.com。

（责任编辑　徐梅）