

基于BWN-CRITIC法的规模化新能源 供电能力评估方法

杨超凡,吴 军,杨超峰,崔世庭,王林,向志民

(1. 电网环境保护全国重点实验室,湖北 武汉 430072;2. 武汉大学 电气与自动化学院,
湖北 武汉 430072)

摘 要:在新能源大规模并网的背景下,准确评估规模化新能源的供电能力对提升电力系统经济性与可靠性至关重要。为解决现有评估方法中指标权重分配主观性强、评估维度单一的问题,提出一种基于最优最劣网络法(BWN)与改进权重分析法(CRITIC)的规模化新能源供电能力评估方法。首先,构建涵盖“新能源外送能力”与“本地消纳能力”的双维度评估指标体系,以全面表征规模化新能源供电能力的核心特征。在指标赋权方面,采用BWN法集成专家经验确定主观权重,并引入变异系数改进CRITIC法以更精确提取数据客观信息,最后通过乘法合成融合主客观权重,实现指标重要性的双向修正。算例结果表明,所提方法能够有效契合电网实际运行特性,兼具科学性与工程实用性,可为高比例新能源电力系统的规划与运行提供量化决策支持。

关键词:规模化新能源;供电能力;外送能力;最优最劣网络;CRITIC赋权法

0 引言

随着全球能源结构转型及中国“双碳”目标的推进,以风电、光伏为代表的新能源在电力系统中的渗透率逐年攀升。由于新能源固有的波动性与间歇性,对传统以火电为主体的电力系统供电能力评估体系形成了显著挑战,致使传统方法难以适配高比例新能源场景下的供电能力量化需求。供电能力是电力系统在满足静态安全、动态稳定、频率调节、电能质量以及可靠性等多重约束条件下^[1-2],能够持续向负荷节点提供电能的最大容量,其本质反映了系统发电资源、输电网络及配电设施综合作用下形成的能量供给上限。

传统的供电能力概念主要针对配电网,文献[3-5]提出最大供电能力(Total Supply Capability, TSC)及可用供电能力(Available Supply Capability, ASC)相关概念,建立了最大供电能力线性规划计算模型,并从经济性、动态性、安全性维度总结了现有研究的核心侧重点。文献[6-11]将供电能力的概念扩展到了输配全局电网及综合能源网层面,并分析及评估新能源出力不确定性给电网供电能力及安全稳

定运行带来的影响。文献[12-15]分别采用数据驱动鲁棒优化、云-边协同智能算法、概率函数圆抽样等方法,提升了不确定场景下的供电能力评估效率与保障效果。文献[16-22]围绕供电能力评估,构建了涵盖多维度的评估指标体系,并在此基础上建立了综合考虑负荷时序特性与用户差异化需求的供电能力评估模型。文献[23-25]采用组合赋权法改进灰色关联分析,实现了供电能力关键影响因素与薄弱区域的精准识别。对于大规模风电、光伏接入的大电网,部分研究从新能源消纳能力、输电能力等方面展开。文献[26-29]以多断面输电能力与新能源弃电风险差值最大化为目标,提出一种计及新能源消纳的关联断面极限功率计算方法。文献[30-35]基于最优潮流、输电断面视角,构建含静态电压稳定约束与分布式光伏的供电能力模型,通过改进Benders算法和目标级联分析法实现分层优化。

综上所述,本文针对现有评估中指标权重分配主观性强及维度单一的问题,提出一种基于最优最劣网络法(Best-Worst Network, BWN)-改进权重分析法(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC)的规模化新能源供电能力评估方法。研究的创新点在于:(1)针对规模化新能源并网的运行特性,构建了涵盖新能源外送能力与本地消纳能力的双维度评估指标体系,弥补了传统评估维度单一的局限;(2)采用BWN与改进CRITIC组合赋权模

基金项目:智能电网重大专项(2030)资助项目(2025ZD0806600)

Project Supported by Smart Grid-National Science and Technology
Major Project(2025ZD0806600)

型,兼顾专家工程经验与指标数据的客观特征,提升了供电能力评估结果的合理性与工程适用性,可为高比例新能源电力系统的规划运行提供量化决策支撑。

1 规模化新能源供电能力评估指标体系

规模化新能源供电能力评估指标体系^[36]如图1所示。该体系由新能源外送能力(Renewable Energy Export Capability, REEC)、新能源本地消纳能力(Renewable Energy Accommodation Capability, REAC)2个一级指标及若干二级指标构成。其中,新能源外送能力用于表征外送过程的稳定性与持续性,新能源本地消纳能力用于表征本地承载与经济运行水平。所涉及指标分为极大型指标与极小型指标2类,极大型指标为数值越大性能越优的效益型指标,极小型指标为数值越小性能越优的成本型指标,二者均通过标准化处理统一为“数值越大、性能越优”的量化形式,文中后续各指标仅标注类型,不再重复说明指标数值与性能的对应关系。

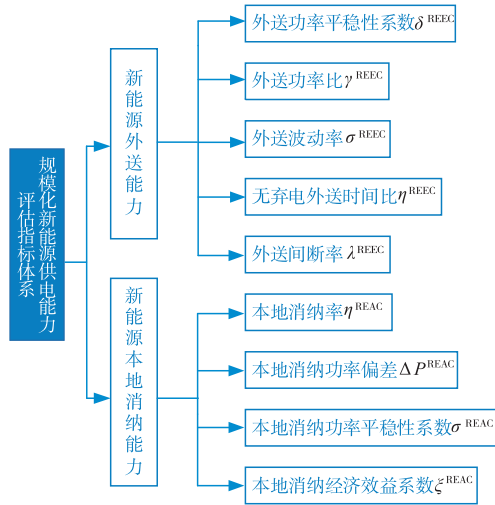


图1 规模化新能源供电能力评估指标体系
Fig.1 Evaluation index system for large-scale renewable energy power supply capacity

1.1 新能源外送能力

新能源外送能力主要通过5个二级指标进行量化,分别为 δ^{REEC} 、 γ^{REEC} 、 σ^{REEC} 、 η^{REEC} 、 λ^{REEC} 。新能源外送能力 S^{REEC} 的表达式为:

$$S^{\text{REEC}} = A^{\text{REEC}} Q^{\text{REEC}} \quad (1)$$

式中: A^{REEC} 为新能源外送能力二级指标的矩阵,其维度为 $T \times 5$, T 为单日评估周期内的总采样点数(本文算例中, $T=24 \text{ h}/15 \text{ min}=96$); Q^{REEC} 为新能源外

送能力权重矩阵,其维度为 5×1 ,由5项外送能力二级指标组合权重构成。

使用外送功率的方差计算 δ^{REEC} (极小型),归一化后表达式为:

$$\delta^{\text{REEC}} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_t^{\text{REEC}} - P_{\text{ave}}^{\text{REEC}})^2}{T(P_{\text{max}}^{\text{REEC}} - P_{\text{ave}}^{\text{REEC}})^2} \quad (2)$$

式中: P_t^{REEC} 为 t 时刻的外送功率; $P_{\text{max}}^{\text{REEC}}$ 为采样时间内的最大外送功率; $P_{\text{ave}}^{\text{REEC}}$ 为外送功率的平均值。

γ^{REEC} (极大型)采用一定时间段内的平均外送功率与最大外送功率之比表示,反映外送功率的均衡程度以及外送能力可提升范围。其表达式为:

$$\gamma^{\text{REEC}} = \frac{P_{\text{ave}}^{\text{REEC}}}{P_{\text{max}}^{\text{REEC}}} \quad (3)$$

通过计算外送功率在相邻时刻的差值并进行归一化处理,可得到 σ^{REEC} (极小型)指标,用以表征整个 T 时段内外送功率的波动情况。 σ^{REEC} 的表达式为:

$$\sigma^{\text{REEC}} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} |P_{t+1}^{\text{REEC}} - P_t^{\text{REEC}}|}{(T-1)P_{\text{ave}}^{\text{REEC}}} \quad (4)$$

式中: P_{t+1}^{REEC} 为 $t+1$ 时刻的外送功率。

η^{REEC} (极大型)表示本地富余新能源无弃电全额外送的时间占总评估时长的比例,用于衡量系统新能源消纳水平与运行经济性。其计算表达式为:

$$\eta^{\text{REEC}} = \frac{\sum_{t=1}^T I_t \{P_t^{\text{aba}} = 0\}}{T} \quad (5)$$

式中: P_t^{aba} 为 t 时刻的弃电功率; I_t 为 t 时刻指示函数,值为1时表示新能源未消纳电量可通过外送通道全额送出(无弃电),否则值为0。

λ^{REEC} (极小型)表示设备或线路故障导致外送功率为0的时间占总时段的比例,用于衡量系统的外送可靠性和韧性。其表达式为:

$$\lambda^{\text{REEC}} = \frac{\sum_{t=1}^T I_t \{P_t^{\text{REEC}} = 0\}}{T} \quad (6)$$

1.2 新能源本地消纳能力

新能源本地消纳能力 S^{REAC} 衡量了系统对新能源本地消纳的支撑能力。其表达式为:

$$S^{\text{REAC}} = A^{\text{REAC}} Q^{\text{REAC}} \quad (7)$$

式中: A^{REAC} 为新能源本地消纳能力二级指标的矩阵,其维度为 $T \times 4$; Q^{REAC} 为新能源本地消纳能力权重矩阵,其维度为 4×1 。

η^{REAC} (极大型) 为本地消纳功率和预测功率的比值, 用于衡量新能源预测的准确性和本地电网对新能源的承载能力。其表达式为:

$$\eta^{\text{REAC}} = \frac{P_t^{\text{REAC}}}{P_t^{\text{fore}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: P_t^{REAC} 为 t 时刻新能源消纳功率; P_t^{fore} 为 t 时刻新能源预测功率。

ΔP^{REAC} (极小型) 为新能源消纳功率相对偏差率, 用于衡量新能源实际消纳功率与预测功率的偏离程度, 通过新能源消纳功率与预测功率的差值占消纳功率的比例计算。其表达式为:

$$\Delta P^{\text{REAC}} = \frac{\sum_{t=1}^T |(P_t^{\text{REAC}} - P_t^{\text{fore}}) / P_t^{\text{REAC}}|}{T} \quad (9)$$

δ^{REAC} (极小型) 为新能源消纳功率波动率, 用于表征评估时段内本地新能源消纳功率的波动程度, 通过消纳功率的方差进行计算。其表达式为:

$$\delta^{\text{REAC}} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_t^{\text{REAC}} - P_{\text{ave}}^{\text{REAC}})^2}{T(P_{\text{max}}^{\text{REAC}} - P_{\text{ave}}^{\text{REAC}})^2} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{REAC}}$ 为时间尺度内的本地消纳功率的最大值; $P_{\text{ave}}^{\text{REAC}}$ 为本地消纳功率的平均值。

ξ^{REAC} (极大型) 通过比较优化前后的外送电价和外送功率, 评估优化是否带来了经济价值。其表达式为:

$$\xi^{\text{REAC}} = \frac{p^{\text{REEC}}(P_t^{\text{REAC}} + P_t^T)}{W_0} \quad (11)$$

式中: p^{REEC} 为外送电价; W_0 为基准值, 用于 ξ^{REAC} 的换算; P_t^T 为 t 时刻优化后总采样点数 T 的火电功率。

2 规模化新能源供电能力评估方法

2.1 BWN主观权重指标求解

BWN 是基于网络层次分析方法 (Analytic Network Process, ANP) 和最优最劣法 (Best-Worst Method, BWM) 改进的算法^[37], 用 BWM 算法替代传统算法 ANP 中的层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 相关计算部分, 通过识别指标体系中的最优指标和最劣指标, 构建最优指标与其余指标、其余指标与最劣指标之间的偏好关系, 并以此建立最小偏差优化模型, 从而求取各指标的主观权重。与传统两两比较方法相比, 该方法所需判断次数较少, 既可以保留 ANP 方法考虑各指标间关联性

的优点, 又解决了传统 ANP 方法的一致性检验通过难、计算量过大的问题。

ANP 网络结构如图 2 所示。其中, $P_1, P_2, \dots, P_m$ 为第 1~ m 组控制层向量, 本文中 $m=9$, 对应 9 项二级评估指标向量; 网络层元素组为控制层准则下的同维度关联指标集合, 与控制层准则对应, 即本文二级评估指标影响因素。

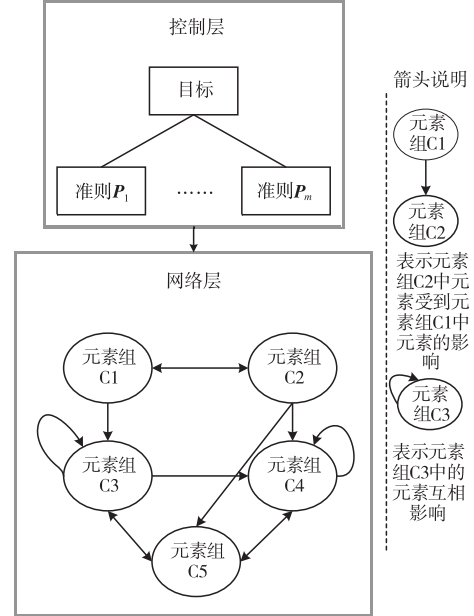


图2 ANP网络结构

Fig.2 ANP network structure

BWN 主观权重指标计算步骤如下:

1) 构建最优、最劣指标向量。依据评估体系构建最优指标向量与最劣指标向量的比较向量, 明确各指标向量相对优劣的初始判断依据。根据专家意见判断各指标的优势度, 使用 1—9 标度法进行量化打分, 确定综合评估体系中功率的最优指标向量 P_{best} 和最劣指标向量 P_{worst} 。

2) 构建指标权重向量。基于最优与最劣指标比较结果构建最优指标权重向量, 结合各指标优势度与控制层准则权重求解向量。令 X 为原始指标 $M \times N$ 阶矩阵, Y 为标准化处理后的 $M \times N$ 阶矩阵, M 为样本数, N 为指标数量。式(12)一式(19)中 i, j, k 均指在 $M \times N$ 阶矩阵中处于第 i 列、第 j 行、第 k 行。9 项二级指标权重向量计算式为:

$$\begin{cases} \min \max \left\{ \left| \frac{\omega_{\text{best}}}{\omega_j} - a_{P_{\text{best}}-P_j} \right|, \left| \frac{\omega_j}{\omega_{\text{worst}}} - a_{P_j-P_{\text{worst}}} \right| \right\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \\ \omega_j \geq 0, 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

式中: ω_{best} 为 P_{best} 的权重; ω_{worst} 为 P_{worst} 的权重; ω_j 为第 j 行控制层准则向量 P_j 的权重; n 为控制层的总项数; $a_{P_{\text{best}}-P_j}$ 为控制层最优指标向量 P_{best} 对 P_j 的优势度; $a_{P_j-P_{\text{worst}}}$ 为 P_j 对控制层最劣指标向量 P_{worst} 的劣势度。

通过 Matlab 优化工具箱带入网络层求解,得到初始权重向量,按外送能力5项指标向量及本地消纳能力4项指标向量依次排列为[0.215 6, 0.178 9, 0.201 3, 0.243 2, 0.032 1, 0.102 5, 0.098 7, 0.095 2, 0.123 1]。

2.2 改进CRITIC客观权重指标求解

传统 CRITIC 法的权重计算过程中^[23],由于不同指标的量纲和数量级存在差异,可能导致计算结果不够准确。为解决这一问题,本文引入变异系数对传统 CRITIC 法进行改进,通过样本数据的标准差与平均值之比来衡量指标的差异性,更有效地反映评价指标体系中某一指标的变化程度。

改进 CRITIC 法指标计算步骤如下:

1) 指标标准化。为消除不同指标量纲与数量级差异对评估结果的干扰,确保各指标具有可比性,需先对原始指标数据进行标准化处理。对 2.1 节所提 $M \times N$ 阶矩阵中的效益型指标(极大型指标)和成本型指标(极小型指标)进行处理,其表达式分别为:

$$y_{ji} = \frac{x_{ji} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (13)$$

$$y_{ji} = \frac{\max(x_j) - x_{ji}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (14)$$

式中: y_{ji} 为标准化 $M \times N$ 矩阵中第 j 行第 i 列指标; x_j 为原始 $M \times N$ 矩阵中的第 j 行指标向量; x_{ji} 为原始 $M \times N$ 矩阵中第 j 行第 i 列指标。

2) 指标冲突性计算。指标冲突性反映了指标间的信息重叠程度,冲突性越强,表明指标间冗余信息越少,其在评估中的权重也应越高。第 j 行指标向量的冲突性系数 R_j 为:

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (15)$$

$$r_{ij} = \frac{\text{cov}(y_k, y_j)}{\varepsilon_k \varepsilon_j} \quad (16)$$

式中: r_{kj} 为第 k 行指标向量与第 j 行指标向量之间的相关度; y_k, y_j 分别为标准化后矩阵的第 k, j 行指标向量; $\varepsilon_k, \varepsilon_j$ 为第 k, j 行指标向量的标准差。

3) 计算第 j 行指标向量的变异系数。变异系数用于量化单一指标的数值波动程度,波动越大说明该指标对供电能力的区分度越高、客观权重占比越大。第 j 行指标向量的变异系数 v_j 为:

$$v_j = \frac{\varepsilon_j}{x_j^{\text{ave}}} \quad (17)$$

式中: x_j^{ave} 为 x_j 的平均值。

4) 计算第 j 行指标向量客观权重。结合指标冲突性与变异系数,综合表征各指标向量的客观信息承载量,进而计算得到各指标向量客观权重。第 j 行指标向量的客观权重 β_j 为:

$$\beta_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (18)$$

式中: c_j 为第 j 行指标向量客观信息承载量。

设计算得到的第 j 行指标向量主观权重为 ρ_j , 客观权重为 β_j , 则第 j 行指标向量的组合权重 ∂_j 为:

$$\partial_j = \frac{\sqrt{\rho_j \beta_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\rho_j \beta_j}} \quad (19)$$

2.3 供电能力评估流程

由式(18)一式(19)可知,采用乘法合成法融合主、客观权重,可对二者之间的偏差进行双向修正:仅当主、客观权重均赋予某指标较高重要性时,其组合权重才会显著提升。该方法兼顾专家工程经验与数据的客观规律,更契合新能源评估的实际需求。根据以上原则,得到供电能力评估流程如图3所示。

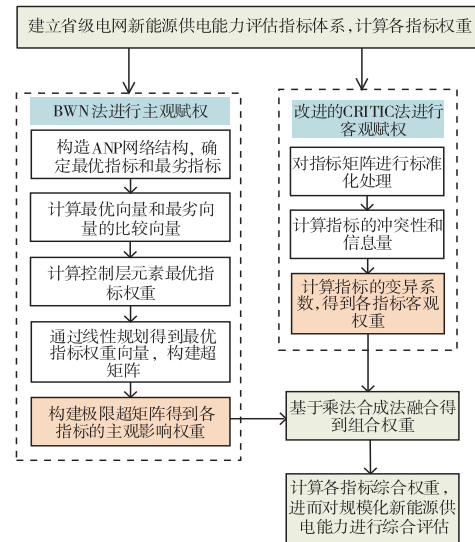


图3 供电能力评估流程

Fig.3 Power supply capacity evaluation process

2.4 基于组合赋权的指标权重分析

为验证所提组合赋权法的有效性,明确各指标对新能源供电能力的影响权重与重要性层级,确定BWN及改进CRITIC法下各指标权重如表1所示。表中权重排序用于直观呈现各指标的重要性优先级,为后续核心影响因素识别提供依据。

表1 BWN与改进CRITIC法下指标权重结果
Table 1 Weight results of each index under BWN and improved CRITIC method

二级指标	BWN法	改进CRITIC法	主客观组合权重	权重排序
δ^{REEC}	0.215 6	0.189 2	0.202 1	1
σ^{REEC}	0.201 3	0.192 7	0.196 9	2
γ^{REEC}	0.178 9	0.164 3	0.171 5	3
η^{REEC}	0.156 8	0.173 5	0.164 9	4
ξ^{REAC}	0.123 1	0.135 4	0.129 1	5
η^{REAC}	0.102 5	0.114 6	0.108 4	6
ΔP^{REAC}	0.098 7	0.103 2	0.100 9	7
δ^{REAC}	0.095 2	0.110 8	0.102 8	8
λ^{REEC}	0.087 4	0.068 9	0.077 8	9

由表1可知,该省新能源供电能力主要受外送能力影响,其中“外送功率平稳性”权重最高(0.202 1),前4项指标均属外送类,合计占比56.39%。同维度指标间强相关(最高达0.851),信息互补;本地消纳维度权重均衡,指标间也呈强相关(最高0.826)。跨维度指标则弱相关(多在0.1—0.4),表明“外送”与“消纳”两大维度相互独立、无冗余,符合设计逻辑。外送间断率权重偏低(0.077 8)是因正常场景下其优先级低且数据平稳,但在极端场景下权重可自适应提升。综上,本文所提BWN-改进CRITIC组合赋权法兼顾专家工程经验与数据客观规律,赋权结果贴合电网实际运行特性,所建双维度指标体系可全面刻画规模化新能源供电能力的核心内涵,具备良好的科学性与工程适用性。

3 算例分析

本文以某省实际电网为例,选取该省2024年8月1—15日的典型实测运行数据,基于15 min分辨率(单日96个采样点,总样本量1 440个)的外送功率、本地消纳功率等数据,系统验证本文所提规模化新能源供电能力评估指标体系及BWN-CRITIC综合赋权评估方法的有效性与可行性。

3.1 新能源外送及消纳能力评估

3.1.1 新能源外送能力评估

基于第2节所述评估体系与赋权模型,对该省实测运行数据进行量化求解,得到新能源外送能力全时段评估结果。新能源外送能力2024年8月1—15日期间指标波动曲线如图4所示。

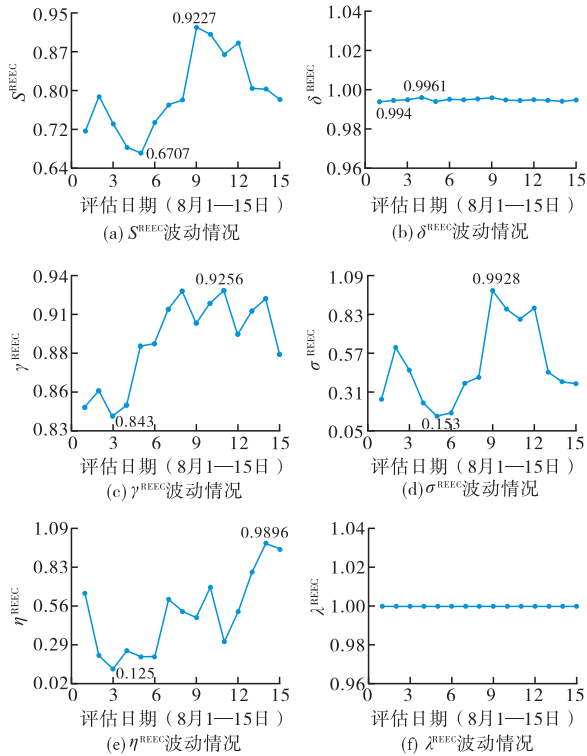


图4 新能源外送能力核心指标波动曲线
Fig.4 Fluctuation curves of core indexes for renewable energy transmission capacity

由图4可知, S^{REEC} 在评估时段内波动较大,8月5日降低至0.670 7,8月9日上升至0.922 7,波动幅度达37.6%。 δ^{REEC} 评估时段内最小值为0.994(8月1日),最大值达0.996 1(8月4日)。 γ^{REEC} 整体波动范围在0.843~0.925 6,反映外送功率处于长期均衡状态。 σ^{REEC} 在评估时段内变化最为剧烈,最小值为0.153(8月5日),原因是当日强对流天气导致风电出力骤升骤降,相邻时刻外送功率最大差值达10 200 MW,短时波动幅度大幅提升;最大值高达0.992 8(8月9日),得益于当日风光出力平稳、风电预测准确率达92.3%。 η^{REEC} 评估时段内最小值为0.125(8月3日),对应当日新能源弃电情况突出;最大值达0.989 6(8月14日),反映当日新能源富余电量全额送出,无弃电情况。 λ^{REEC} 在所有评估日期中均为1,表明评估时段内未发生因设备故障或极端天气导致的外送中断,系统外送可靠性基础良好。分析表明,该省新能源外送能力受风光出力波动影响显著,系统

外送通道可靠性良好,但应对极端天气导致的出力剧烈波动的能力仍有待提升。

3.1.2 新能源本地消纳能力评估

基于同一评估模型与实测数据集,同步完成该省新能源本地消纳能力指标的全时段量化评估,2024年8月1—15日期间各指标波动曲线如图5所示。

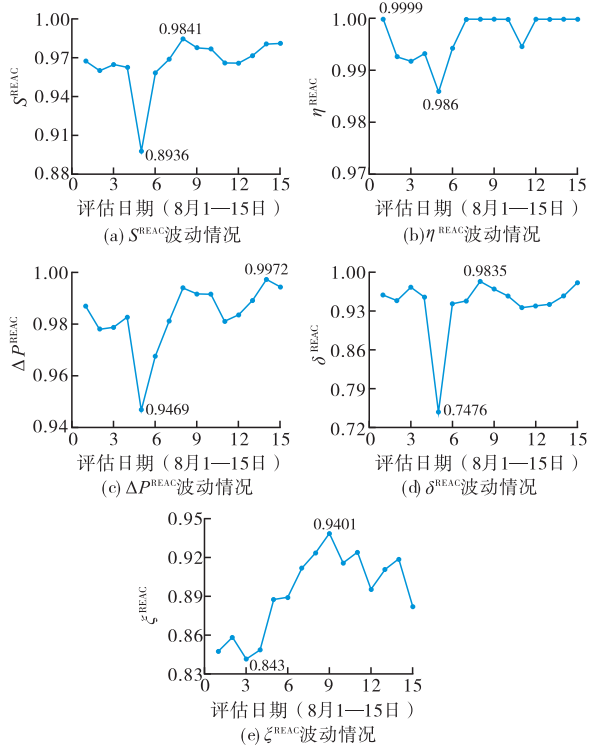


图5 新能源本地消纳指标波动曲线
Fig.5 Fluctuation curves of indexes for renewable energy local integration

由图5可知, S^{REAC} 整体表现稳定,多数时段维持在0.95左右,最低值为8月5日的0.893 6,波动幅度仅5.9%。 η^{REAC} 始终保持在0.986以上, ΔP^{REAC} 波动范围控制在0.946 9~0.997 2之间,表明本地电网对新能源的承载能力较强。 δ^{REAC} 在8月5日降至0.747 6,是导致该日本地消纳能力下降的主要原因。 ξ^{REAC} 整体数值偏低,波动范围介于0.843~0.940 1之间,主要受跨省外送电价峰谷差、火电调峰成本影响,具备较大提升空间。分析表明,该省新能源本地消纳能力整体运行平稳,基础承载能力与消纳控制精度表现良好,但新能源消纳的经济效益仍有较大提升空间,极端天气下的消纳平稳性仍需进一步优化。

3.2 供电能力评估

结合新能源外送、消纳双维度评估结果与指标组合权重,计算得到该省逐日综合供电能力,评估

结果如表2所示。

表2 供电能力评估结果
Table 2 Evaluation results of power supply capacity

日期	供电能力	日期	供电能力
8月1日	0.798 8	8月9日	0.904 8
8月2日	0.842 1	8月10日	0.931 4
8月3日	0.807 6	8月11日	0.900 5
8月4日	0.775 2	8月12日	0.915 7
8月5日	0.745 0	8月13日	0.857 0
8月6日	0.770 5	8月14日	0.859 4
8月7日	0.833 9	8月15日	0.845 7
8月8日	0.846 3		

由表2可知,该省的供电能力主要在0.745 0~0.931 4之间波动,其中在8月5日出现最小值0.745 0。数据统计结果表明,该省新能源供电能力整体受外送能力波动主导,本地消纳能力提供了稳定支撑,正常工况下供电能力表现良好,但极端天气下的供电稳定性仍有较大提升空间。

该省2024年8月1—15日期间的供电能力、 S^{REEC} 和 S^{REAC} 评估结果如图6所示。

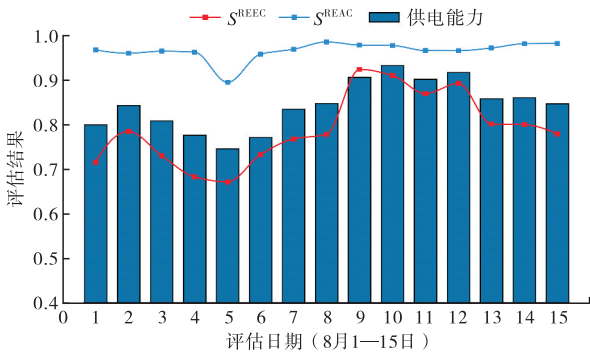


图6 供电能力、 S^{REEC} 和 S^{REAC} 评估结果
Fig.6 Evaluation results of power supply capacity, S^{REEC} , and S^{REAC}

由图6可知,该省供电能力波动显著,8月5日出现最小值、8月10日达最大值;其中 S^{REEC} 波动幅度较大, S^{REAC} 运行整体平稳,仅8月5日出现时段低值。分析表明,规模化新能源供电能力的波动主要由 S^{REEC} 主导,其与 S^{REAC} 的变化趋势高度一致,与第2节权重分析结论相印证,二者运行水平直接决定供电能力高低,而其他因素产生的影响较弱,仅在极端场景下放大供电能力低谷,本质上体现了新能源外送与本地消纳过程的协调水平。

4 结语

本文针对现有评估中指标权重分配主观性强

及维度单一的问题,提出一种基于BWN-CRITIC法的规模化新能源供电能力评估方法。有效揭示了外送能力稳定性是影响区域供电能力的核心因素,所提出的BWN-改进CRITIC组合赋权法融合了专家经验与数据客观规律,经实证验证具有良好的科学性与工程适用性。

未来研究将引入共享储能、虚拟电厂等新型调控主体,拓展多场景评估,为高比例新能源电力系统的规划与运行提供更坚实的理论支撑。

参考文献

- [1] 黄梦旗,李勇汇,杨军,等.含风光储岸电供电系统的分布鲁棒优化运行策略[J].浙江电力,2024,43(9):1-9.
HUANG Mengqi, LI Yonghui, YANG Jun, et al. Distributionally robust optimal operation strategy of power supply system including wind-solar-storage shore power[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9):1-9.
- [2] 张智,徐永海,张世聪,等.直流配电网电能质量指标研究综述[J].电力系统保护与控制,2025,53(3):172-187.
ZHANG Zhi, XU Yonghai, ZHANG Shicong, et al. Review on power quality indexes of dc distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3):172-187.
- [3] 邵雪,栗子豪,陈昭宇,等.以N-1满足率为约束的配电网最大供电能力评估[J].山东电力技术,2024,51(9):65-73.
TAI Xue, LI Zihao, CHEN Zhaoyu, et al. Maximum power supply capability assessment of distribution network constrained by N-1 compliance rate[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(9):65-73.
- [4] ZUO G, WANG Y, JIANG X, et al. Total supply capability of electricity distribution networks considering flexible interconnection of low-voltage service transformers[J]. IET Smart Grid, 2024, 7(2):248-260.
- [5] 马雨欣,林凌雪.面向配电网精准规划的最大供电能力评估方法[J].现代电力,2025,42(6):1120-1130.
MA Yuxin, LIN Lingxue. Maximum power supply capacity evaluation method for precise planning of distribution networks[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(6):1120-1130.
- [6] 彭寒梅,肖千皓,谭貌,等.基于时序卷积网络的低压柔性互联配电网短期最大供电能力评估[J].南方电网技术,2025,19(10):111-120.
PENG Hanmei, XIAO Qianhao, TAN Mao, et al. Short-term maximum power supply capacity evaluation of low-voltage flexible interconnected distribution networks based on temporal convolutional network[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(10):111-120.
- [7] 张健伟.110kV及以下区域配电网供电能力评估方法[J].电工技术,2024(1):63-65.
ZHANG Jianwei. Evaluation method for power supply capacity of 110kV and below regional distribution networks[J]. Electrotechnical Application, 2024(1):63-65.
- [8] 马梓耀,张博,张璐,等.考虑经济性与韧性均衡的交直流混合配电网协调规划[J].电力系统自动化,2025,49(6):78-87.
MA Ziyao, ZHANG Bo, ZHANG Lu, et al. Coordinated planning of ac/dc hybrid distribution network considering balance between economy and resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(6):78-87.
- [9] 沈祎淳,彭弘毅,晏鸣宇.高比例新能源接入的交直流混联配电系统分散协同调度方法[J].智慧电力,2025,53(10):36-43.
SHEN Yichun, PENG Hongyi, YAN Mingyu. Decentralized collaborative scheduling method for ac/dc hybrid distribution system with high proportion of new energy access[J]. Smart Power, 2025, 53(10):36-43.
- [10] 宋晓华,冯汗青,汪鹏.考虑需求响应的源网荷储一体化运行策略研究——基于复杂网络博弈推演的分析[J].价格理论与实践,2024,(10):138-145,227.
SONG Xiaohua, FENG Hanqing, WANG Peng. Research on integrated operation strategy of source-grid-load-storage considering demand response—analysis based on complex network game deduction[J]. Price: Theory & Practice, 2024, (10):138-145,227.
- [11] XU W X, ZHOU X, ZHANG T F. Reliability assessment of islanded microgrids considering generation-load uncertainty[C]//2024 China Automation Congress (CAC). Qingdao, China, 2024:1-6.
- [12] ZHU J, LI Z Y, XIE Y, et al. Real-Time detection of low-frequency oscillations in traction power supply systems based on optimized atomic decomposition[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(6):49-62.
- [13] 张仕鹏,聂涌泉,胡亚平,等.基于云边协同的多微电网双层分布式能源调度[J].南方电网技术,2025,19(4):27-38.
ZHANG Shipeng, NIE Yongquan, HU Yaping, et al. Bi-level distributed energy scheduling of multi-microgrid based on cloud-edge collaboration[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(4):27-38.
- [14] WANG H, WANG C, LI P, et al. Analytical reliability evaluation framework for distribution systems with microgrids considering renewable generation and load uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(5):6319-6331.
- [15] 乔俊峰,周爱华,彭林,等.基于多源数据深度融合的配电网运行评价方法[J].中国电力,2024,57(6):193-203.
QIAO Junfeng, ZHOU Aihua, PENG Lin, et al. Operation evaluation method of distribution networks based on multi-source data deep fusion[J]. Electric Power, 2024, 57(6):193-203.
- [16] LI Y, WANG Y, ZHANG Y, et al. Co-optimization of network reconfiguration and distributed energy resources planning for distribution system flexibility enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4):2456-2467.

- [17] XIE S Y, JIANG Q, LEUNG V C M, et al. Joint bitrate adaptation and resource allocation by leveraging SVC setting for wireless scalable video multicast[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(4): 1099–1103.
- [18] 刘文军, 李帅虎, 马瑞, 等. 低压配电台区柔性互联系统多目标DDPG优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 62–70.
- LIU Wenjun, LI Shuaihu, MA Rui, et al. Multi-Objective DDPG optimal scheduling for flexible interconnection system of Low-Voltage distribution station areas[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 62–70.
- [19] 赵宇, 李谦, 张云晓, 等. 含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 25–32, 49.
- ZHAO Yu, LI Qian, ZHANG Yunxiao, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage considering power supply reliability in distribution network with distributed energy[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 25–32, 49.
- [20] 巨云涛, 周伟鹏, 于宗民. 考虑移动储能车提升系统供电可靠性的配电网规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 128–138.
- JU Yuntao, ZHOU Weipeng, YU Zongmin. A distribution network planning approach considering mobile energy storage vehicles to enhance system power supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 128–138.
- [21] 陈冰冰, 刘家腾, 吴浩天, 等. 基于供电能力动态提升的配电网故障抢修与恢复协调优化[J]. 山东电力技术, 2025, 52(8): 25–35, 44.
- CHEN Bingbing, LIU Jiateng, WU Haotian, et al. Coordinated optimization of distribution network fault repair and recovery based on dynamic improvement of power supply capacity[J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(8): 25–35, 44.
- [22] 李东东, 申润祺, 杨帆, 等. 基于信息间隙决策理论的多区域电网源-储-荷灵活优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 39–51.
- LI Dongdong, SHEN Runqi, YANG Fan, et al. Flexible optimal operation strategy of source-storage-load in multi-regional power grid based on information gap decision theory[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 39–51.
- [23] 霍晓占, 刘延泉, 周兴华, 等. 基于改进灰色关联分析和Stacking算法的配电网线损预测研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(5): 79–86.
- HUO Xiaozhan, LIU Yanquan, ZHOU Xinghua, et al. Research on distribution network line loss prediction based on improved grey relational analysis and stacking algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 52(5): 79–86.
- [24] 张荣伟, 唐晓杰, 李龙, 等. 融合主成分含噪密度聚类与综合关联分析的混合非侵入式负荷辨识方法[J]. 现代电力, 2025, 42(3): 401–410.
- ZHANG Rongwei, TANG Xiaojie, LI Long, et al. Hybrid non-intrusive load identification method integrating principal component noisy density clustering and comprehensive correlation analysis[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(3): 401–410.
- [25] 蒋航, 熊俊, 项震, 等. 基于改进Apriori算法的智能电网安全稳定控制装置缺陷关联性分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 195–202.
- JIANG Hang, XIONG Jun, XIANG Zhen, et al. Correlation analysis of defects in smart grid security and stability control devices based on improved Apriori algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 195–202.
- [26] 彭浩晋, 邱高, 刘友波, 等. 基于无监督学习的多断面耦合输电限额条件映射规则生成及其分档切换方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(19): 7510–7525.
- PENG Haojin, QIU Gao, LIU Youbo, et al. Mapping rule generation and gear switching method of multi-section coupled transmission limit conditions based on unsupervised learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(19): 7510–7525.
- [27] 周国梁, 高丽萍, 梁言桥, 等. 柔性直流输电系统多端异构通用化阻抗建模与分析[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 73–85.
- ZHOU Guoliang, GAO Liping, LIANG Yanqiao, et al. Generalized impedance modeling and analysis of multi-terminal heterogeneous flexible DC transmission systems[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 73–85.
- [28] 彭琦, 欧阳森, 张晋铭, 等. 考虑多断面源荷特征匹配的高比例分布式光伏接入配电网的集群划分方法[J]. 南方电网技术, 2025, 19(4): 161–172, 184.
- PENG Qi, OUYANG Sen, ZHANG Jinming, et al. Cluster division method for distribution network with high proportion distributed photovoltaic access considering multi-section source-load characteristic matching[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(4): 161–172, 184.
- [29] 赵津蔓, 韩肖清, 牛哲文, 等. 考虑暂态稳定过程的电力系统运行状态辨识[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 7970–7982.
- ZHAO Jinman, HAN Xiaoqing, NIU Zhewen, et al. Power system operation state identification considering transient stability process[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 7970–7982.
- [30] 陈卓, 郭寅远, 温彦军, 等. 基于广义Benders分解的分布式光伏接入容量规划方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(6): 31–40.
- CHEN Zhuo, GUO Yuanyuan, WEN Yanjun, et al. Capacity planning method of distributed pv access based on generalized benders decomposition[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 31–40.
- [31] 罗澍忻, 金楚, 彭虹桥, 等. 基于Benders分解的交直流混合输电网络随机扩展规划方法[J]. 现代电力, 2024, 41(4): 680–688.
- LUO Shuxin, JIN Chu, PENG Hongqiao, et al. Stochastic expansion planning method for AC/DC hybrid transmission grid based on Benders decomposition[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(4): 680–688.
- [32] 张旋, 张玉敏, 吉兴全, 等. 基于目标级联分析法的输电网结构优化[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 218–224.
- ZHANG Xuan, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Transmission

- grid structure optimization based on analytical target cascading [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43 (2): 218–224.
- [33] 徐良德, 黄馨仪, 郭挺, 等. 考虑分布式光伏不确定性的输配电系统供电能力评估[J]. 广东电力, 2024, 37(6): 11–20.
- XU Liangde, HUANG Xinyi, GUO Ting, et al. Power supply capability assessment of transmission and distribution system considering uncertainty of distributed photovoltaics[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(6): 11–20.
- [34] 万思宇, 程杉, 刘炜炜, 等. 基于多主体博弈的配电网-多综合能源系统分布式优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(22): 111–122.
- WAN Siyu, CHENG Shan, LIU Weiwei, et al. Distributed optimal scheduling of distribution network-multiple integrated energy systems based on multi-agent game [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22): 111–122.
- [35] 汪旻, 李群山, 黄牧涛, 等. 考虑输电断面耦合与直流稳定支撑的大电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1524–1531.
- WANG Yang, LI Qunshan, HUANG Mutao, et al. A Method for assessing the maximum power supply capability of large power grids considering transmission section coupling and DC stability support [J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1524–1531.
- [36] 刘海鹏, 杨晓静, 陆涛, 等. 考虑分布式新能源的电网运行风险评估指标体系构建方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(12): 1–14.
- LIU Haipeng, YANG Xiaojing, LU Tao, et al. Construction method of power grid operation risk assessment index system considering distributed new energy[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 1–14.
- [37] 廖奕洋, 王晓彤, 郭森. 基于博弈论组合赋权和二维可分割云模型的VPP运行安全风险评价研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(10): 70–78.
- LIAO Yiyang, WANG Xiaotong, GUO Sen. Research on operation safety risk assessment of virtual power plant based on game theory combination weighting and two-dimensional divisible cloud model [J]. Smart Power, 2025, 53(10): 70–78.

(责任编辑 李 萌)

收稿日期: 2026-01-27; 修改日期: 2026-04-08

作者简介: 杨超凡(2000), 男, 湖南吉首人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统规划与优化。E-mail: 552391450@qq.com

吴军(1977), 男, 通信作者, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划、综合能源系统、电力系统稳定分析与控制等。E-mail: byronwu@whu.edu.cn

Assessment Method for Large-scale Renewable Energy Power Supply Capacity Based on BWN-CRITIC Method

YANG Chaofan, WU Jun, YANG Chaofeng, CUI Shiting,
WANG Lin, XIANG Zhimin

(1.State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan 430072, China;
2.School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the context of large-scale grid integration of renewable energy, accurately assessing the power supply capacity of large-scale renewable energy is crucial for improving the economy and reliability of power systems. To address the issues of high subjectivity in index weight allocation and single-dimensional evaluation in existing assessment methods, this paper proposes an evaluation method for large-scale renewable energy power supply capacity based on the best-worst network (BWN) method and the improved criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method. First, a dual-dimension evaluation index system covering “renewable energy transmission capacity” and “local consumption capacity” is constructed to comprehensively characterize the core features of large-scale renewable energy power supply capacity. For index weighting, the BWN method is used to integrate expert experience and determine subjective weights, while the coefficient of variation is introduced to improve the CRITIC method for more accurate extraction of objective information from data. Finally, subjective and objective weights are combined via multiplicative synthesis to achieve bidirectional adjustment of index importance. Case study results show that the proposed method effectively aligns with the actual operational characteristics of power grids, offering both scientific rigor and engineering practicality, and can provide quantitative decision support for the planning and operation of power systems with a high proportion of renewable energy.

Key words: large-scale renewable energy; power supply capacity; transmission capacity; Best-Worst Network; CRITIC weighting method