

计及源荷匹配特性的新能源可信容量评估方法

赵龙¹, 李文升¹, 曹永吉², 张恒旭², 米元泽², 袁振华¹

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东省 济南市 250021; 2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室 (山东大学), 山东省 济南市 250061)

Renewable Energy Credible Capacity Assessment Method Considering Source-load Matching Characteristics

ZHAO Long¹, LI Wensheng¹, CAO Yongji², ZHANG Hengxu², MI Yuanze², YUAN Zhenhua¹

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, Shandong Province, China; 2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, Shandong Province, China)

摘要: 可信容量是衡量新能源对电力系统发电容量贡献效益的重要指标, 对于含新能源系统的规划和调控极为重要。考虑到同一地区新能源出力与负荷存在一定相关性, 提出一种计及源荷匹配特性的新能源可信容量评估方法。基于核密度估计求得新能源出力概率模型, 采用 Copula 函数分季节场景描述新能源出力与负荷需求之间的相关关系, 建立新能源总出力概率模型, 继而构建源荷联合概率密度分布模型。生成计及源荷相关性的出力场景, 基于等可靠性指标和可信容量表征指标进行可信容量评估。最后, 通过某地区实际算例分析, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 新能源; 匹配特性; 概率模型; 可信容量

Abstract: The credible capacity is an important index to measure the contribution of renewable energy to the generation capacity of the power grid and is extremely important to the planning and regulation of power grid containing new energy system. Considering the fact that there exists a certain correlation between the new energy output and load in the same region, a method to assess credible capacity of new energy, in which the source-load matching characteristics was taken into account, was proposed. Based on the kernel density estimation the new energy output probability model was acquired, and the Copula function was used to describe the correlation between renewable energy and load in seasonal scenarios, and a source-load joint probability density distribution model was constructed to generate source-load correlation output scenarios. Based

on reliability index and credible capacity characteristic index the assessment on credible capacity was performed. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the analysis on practical example of a certain region.

Keywords: renewable energy; matching characteristics; probabilistic model; credible capacity

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0047

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”政策的大力推进, 绿色经济加速发展, 大规模新能源并网将是大势所趋^[1-2]。一方面, 新能源出力的波动性和间歇性特点导致其对电力系统的容量贡献量难以评估; 另一方面, 同一地区新能源场站在相似的地理环境和气候条件下的出力与负荷匹配特性对容量贡献程度的影响也将难以忽略^[3-4]。因此, 为准确评估新能源发电对电力系统的容量贡献效益, 必须对大规模新能源并网的电力系统进行可信容量研究。

目前, 新能源出力互补特性分析主要通过概率建模描述其出力间的相关性实现。文献 [5] 提出了一种基于 Pearson 线性相关系数的协同系数法来分析风电和光伏出力之间的相关性。文献 [6-7] 采用混合 Copula 函数描述多风电场出力空间相关性, 构建多风电场出力的联合概率分布模型。文献 [8] 基于 Copula 理论描述风电功率相关性并通过模糊 C 均值聚类法考虑风电不确定性, 建立了概率风功率模型。文献 [9] 基于多元正态分布函数和 Copula 函数, 建立了多风电场时空相

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52177096); 国网山东省电力公司科技资助项目 (5206002000QD)
Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52177096); Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Corporation (5206002000QD)

关性分析模型。文献 [10] 利用典型日数据的理想出力提取方法和基于向量自回归模型的幅值参数序列生成方法, 提出一种考虑时空相关性的光伏出力序列生成算法。文献 [11] 利用非参数估计描述风光概率分布, 基于 Frank-copula 函数建立风光出力相关性模型。以上文献将新能源出力互补特性理解为其负相关性, 此类研究在多源互补系统出力波动性分析中发挥了重要作用, 但未充分计及源荷匹配关系, 一定程度上限制了新能源有序规划和消纳。

国内外学者在新能源可信容量评估方面也已经开展了大量研究。文献 [12] 考虑天气类型和设备停运概率, 基于分层抽样法改进光伏系统的出力模型并进行可靠性和可信容量的评估。文献 [13] 基于人工神经网络的经验模型, 提出了一种考虑光伏有效载荷能力以及间歇性特性的可信容量评估方法。文献 [14] 基于半不变量法考虑风速变化特性的风电出力模型, 提出了基于拉丁超立方抽样的风电容量可信度评估方法。文献 [15] 基于蒙特卡洛模拟和自适应策略, 提出了一种量化含储能多区域电力系统新能源可信容量计算方法。文献 [16] 以有效载荷容量作为可信容量评估指标, 提出了一种基于加速时序蒙特卡洛法的风电场置信容量评估方法, 该方法和线性插值法相结合, 了解析法无法考虑负荷时序的问题。文献 [17] 考虑需求响应, 基于序贯蒙特卡洛可靠性指标计算框架, 进行分布式电源可信容量计算。以上文献主要针对单个新能源场站可信容量评估进行了深入研究, 但评估过程中对同一地区多新能源场站之间互补性以及和负荷的匹配特性问题还需进一步研究。

针对以上问题, 本文提出一种计及源荷匹配特性的新能源可信容量评估方法, 该方法从源荷匹配角度考虑新能源出力特性, 认为新能源总出力具有波动性, 其出力和负荷需求存在一定相关性, 即源荷匹配特性。基于拓展一致性指标和 Spearman 相关性系数进行源荷匹配特性分析, 然后分别建立源荷概率模型, 基于 Copula 函数建立新能源总出力的联合概率分布, 继而对源荷双侧进行联合概率特性建模, 生成源荷相关性场景; 基于等可靠性指标和可信容量表征指标进行可信容量评估。最后, 分析了源荷匹配特性对新能源可信容量评估结果的影响, 并验证了所提方法的有效性。

1 源荷匹配特性分析

基于新能源总出力的平稳性, 传统的新能源出力特性常采用各场站之间出力相关性来描述, 鲜有考虑新能源出力对负荷需求的追踪能力。实际上, 新能源出力和负荷需求均存在波动情况, 同一地区内, 新能源出力特性和负荷需求存在一定的相关性, 即源荷匹配特性。新能源出力与负荷需求呈正相关性, 则表明源荷匹配特性好, 否则, 表明源荷匹配特性差。

利用一致性指标对源荷匹配特性进行分析,

$$\zeta_h^t = \mu_{\text{res}}^t - \mu_{\text{load}}^t \quad (1)$$

$$\mu_{\text{res}}^t = \frac{Z_{\text{res}}(t+T) - Z_{\text{res}}(t)}{Z_{\text{res}}(t)} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{load}}^t = \frac{Z_{\text{load}}(t+T) - Z_{\text{load}}(t)}{Z_{\text{load}}(t)} \quad (3)$$

式中: μ_{res}^t 和 μ_{load}^t 分别为新能源出力和负荷的变化率; ζ_h^t 为 t 时刻新能源出力和负荷变化量变化的一致性, ζ_h^t 越接近于 0, 两者一致性越好, 当 $\zeta_h^t = 0$ 时, 表示新能源出力和负荷的变化率方向相同、大小相等, 具有完全一致性; $Z_{\text{res}}(t+T)$ 和 $Z_{\text{res}}(t)$ 分别为 $t+T$ 时刻和 t 时刻的新能源出力; $Z_{\text{load}}(t+T)$ 和 $Z_{\text{load}}(t)$ 分别为 $t+T$ 时刻和 t 时刻的负荷。

可进一步推出 T 时段内的平均一致性指标为

$$A_\xi = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \zeta_h^t}{n-1} \quad (4)$$

式中: n 为样本容量; A_ξ 越接近于 0, 表明源荷一致性越好, 即匹配特性越好。

基于上述定义的源荷匹配特性指标, 对某地区进行源荷匹配特性分析。图 1 为某地区四季典型日的新能源出力和负荷小时级散点图。

由图 1 可知, 该地区源荷匹配特性具有明显的季节差异, 因此本文分场景将一致性指标拓展如下:

$$A_\xi = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{n-1} A_\xi^i = \sum_{i=1}^k \theta_i A_\xi^i \quad (5)$$

式中: A_ξ^i 为第 i 个场景的一致性指标; n_i 为第 i 个场景的样本容量, $\sum_{i=1}^k n_i = n-1$; θ_i 为第 i 个场景样本数占总样本数的比重, 即权重系数。

采用 Spearman 相关性系数和本文所定义的一

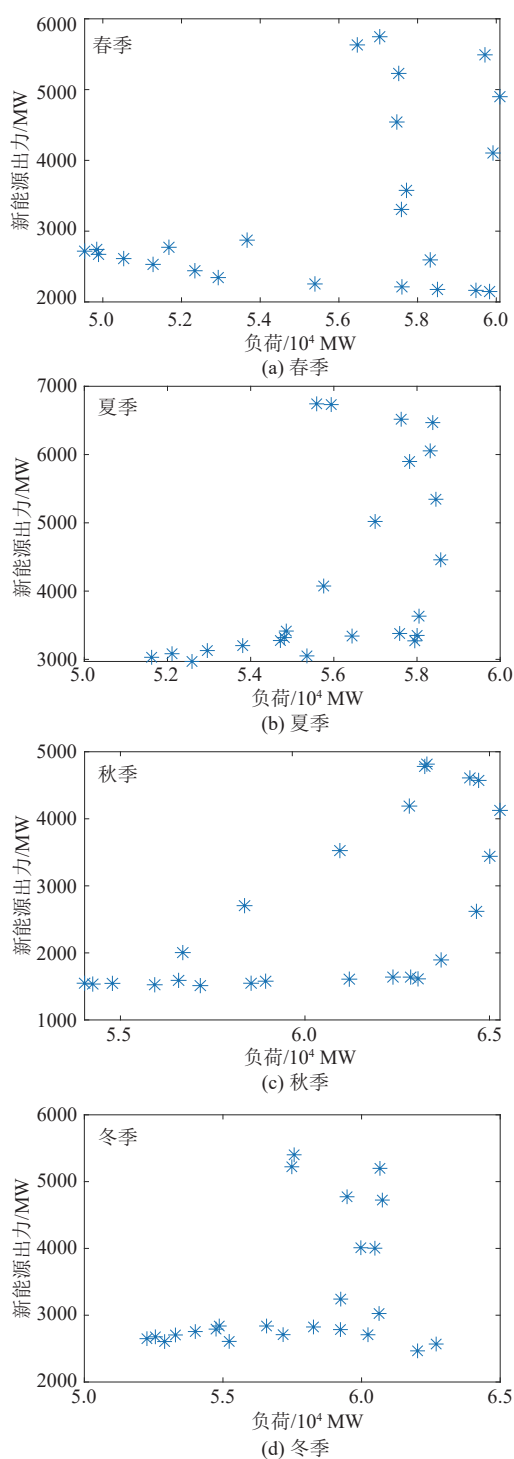


图 1 四季典型日总出力、负荷散点图

Fig. 1 Flowchart of credible capacity assessment

致性指标对该地区历史数据进行源荷特性分析。

Spearman 秩相关性系数定义为：

$$\rho_s = 3 \left\{ P \left[\begin{array}{l} (V_1 - V_2)(U_1 - U_3) > 0 \\ (V_1 - V_2)(U_1 - U_3) < 0 \end{array} \right] \right\} \quad (6)$$

式中：\$(V_1, V_2)\$ 和 \$(U_1, U_2)\$ 为相互独立且服从相同分

布的随机向量；\$P(\cdot)\$ 为其概率密度函数。

图 1 所示春夏秋冬四季场景的 Spearman 相关性系数分别为 0.1687、0.7557、0.6452 和 0.2939，四季场景一致性指标分别为 1.5242、0.7805、0.8577 和 1.2292。可见，该地区春、冬季新能源出力与负荷匹配特性较差，而夏、秋季呈现较好的匹配特性，不同季节新能源出力与负荷的匹配程度存在一定差异，新能源出力对系统的贡献度在不同季节也有所不同。

2 计及源荷相关性场景生成方法

2.1 源荷概率分布模型

1) 新能源出力概率分布模型。

对于源端概率分布，包括风电和光伏出力概率分布。目前，常采用参数法计算风速和光照幅度的概率分布模型，继而分别通过风速-风功率和光幅-光功率转换模型求解风电、光伏出力概率模型。然而，新能源功率不仅受风速和光照辐度等自然因素的影响，还受风机和光伏板自身物理因素的影响，因此基于参数法求解的模型误差较大。本文采用非参数法，利用新能源出力历史实测数据，基于核密度估计进行概率特性建模^[18]。

$$f(x_p) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K \left(\frac{x_p - x_i}{h} \right) \quad (7)$$

式中：\$h\$ 为平滑系数且 \$h > 0\$；\$K(\cdot)\$ 为核函数；\$x_i\$ 为随机变量 \$x\$ 的样本；对 \$f(x)\$ 积分可得其累积分布函数。

2) 负荷概率分布模型。

负荷需求与生产生活具有强相关性，负荷的概率特性近似服从正态分布。

$$f(x_l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_l} e^{-\frac{(x_l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2}} \quad (8)$$

式中：\$x_l\$ 是负荷需求；\$\sigma_l\$ 和 \$\mu_l\$ 分别为均值和标准差。基于负荷需求历史数据，采用极大似然估计法，可求出负荷需求概率分布模型。

2.2 Copula 函数参数估计及优选

根据 Sklar 定理^[19-20]，联合分布函数分解为 \$N\$ 个连续的边缘分布和唯一确定的 Copula 连接函数。同样，\$N\$ 元随机变量也可以通过 Copula 函数和各自的边缘分布模型，建立 \$N\$ 元随机变量的联合分布模型，分析多变量之间的相关性。

$$H(x_1, x_2, \dots, x_N) = C(H_1(x_1), H_2(x_2), \dots, H_N(x_N); \theta) \quad (9)$$

式中: $H(\cdot)$ 为多变量联合分布函数; $H_1(x_1), H_2(x_2), \dots, H_N(x_N)$ 为随机变量的边缘分布函数; $C(\cdot)$ 为选取的 Copula 函数; θ 为所选 Copula 函数参数。对上式两侧进行微分可得其概率密度函数:

$$h(x_1, x_2, \dots, x_N) = c \left(\frac{H_1(x_1), H_2(x_2), \dots, H_N(x_N); \theta}{h_1(x_1), \dots, h_N(x_N)} \right) \quad (10)$$

基于 Copula 函数, 本文建立新能源总出力及负荷需求的联合概率分布模型。基于风电、光伏出力和负荷需求的边缘分布, 采用极大似然估计法求取 Copula 函数参数。

选定最优 Copula 函数是 Copula 相关性建模的关键步骤。本文采用平方欧氏距离^[21]作为最优 Copula 函数的校验指标。平方欧式距离越小, 则表示待选 Copula 函数与经验分布函数越相近。

假设随机变量 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 为取自二维总体 (X, Y) 的样本, 记 X, Y 的边缘分布函数分别为 $F_n(x)$ 和 $G_n(y)$, 则平方欧式距离可表示为

$$d_{Gu} = \sum_{i=1}^n |\hat{C}(u_i, v_i) - C(u_i, v_i)|^2 \quad (11)$$

式中: $C(u_i, v_i)$ 为待选 Copula 函数; $\hat{C}(u_i, v_i)$ 为经验 Copula 函数, 即

$$\hat{C}_n(u, v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{[F_n(x_i) \leq u]} I_{[G_n(y_i) \leq v]} \quad (12)$$

式中: $u, v \in [0, 1]$, $I[\cdot]$ 为示性函数。当 $F_n(x_i) \leq u$ 时, $I_{[F_n(x_i) \leq u]} = 1$ 。

采用 Kendall 系数和前述 Spearman 秩相关性系数作为相关性评价指标, 分别计算 Copula 函数抽样生成的模拟数据和原始数据的 Kendall 系数和 Spearman 秩相关性系数, 两者相关性系数越接近, 则 Copula 函数的拟合效果越好。

Kendall 相关性系数定义为:

$$\rho_\tau = P[(V_1 - V_2)(U_1 - U_2) > 0] - P[(V_1 - V_2)(U_1 - U_2) < 0] \quad (13)$$

2.3 考虑源荷相关性场景生成

源荷匹配特性具有较为明显的季节性差异, 本文分季节建立源荷相关性场景生成模型。所提源荷相关性场景生成方法主要包括两部分内容:

一是新能源总出力分布函数构建; 二是源荷相关性场景生成。各季节场景建模方法相同, 下面以夏季场景为例对建模过程进行描述。此外, 新能源出力的不确定性导致其可能存在新能源不出力或出力极小的极端场景, 有必要进行极端场景下新能源可信容量的研究, 以充分衡量新能源对系统的容量贡献效益。

1) 新能源总出力分布函数构建方法。

求取新能源总出力概率分布可以基于 Copula 理论转化为求取风光出力的联合概率分布, 继而可求得新能源总出力所服从的概率分布。

假设随机向量 z_w 和 z_p 分别为风电、光伏出力归一化样本空间, 新能源总出力概率分布计算步骤如下:

① 基于核密度估计, 求出 z_w 和 z_p 的概率密度函数值 $f(z_w)$ 和 $f(z_p)$, 继而积分可得概率分布函数值 $F(z_w)$ 和 $F(z_p)$ 作为 Copula 函数的边缘分布函数值;

② 根据 2.2 小节, 求取最优 Copula 函数参数, 构建 z_w 和 z_p 的联合概率密度函数:

$$h_{res}(z_w, z_p) = c(F(z_w), F(z_p)) \cdot f(z_w) f(z_p) \quad (14)$$

③ 令 $z_{res} = z_w + z_p$, 基于上述联合概率密度函数, 假设风电装机容量为 m , 光伏装机容量为 n , 可推导出 z_{res} 的概率分布函数:

$$\begin{aligned} F(z_{res}) &= P(m \cdot z_w + n \cdot z_p \leq z_{res}) \\ &= \iint_{m \cdot z_w + n \cdot z_p \leq z_{res}} h_{res}(z_w, z_p) dz_w dz_p \\ &= \iint_{m \cdot z_w + n \cdot z_p \leq z_{res}} h_{z_w}(z_w) h_{z_p}(z_p) dz_w dz_p \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} h_{z_p}(z_p) dz_p \int_{-\infty}^{\frac{z_{res}-n \cdot z_p}{m}} h_{z_w}(z_w) dz_w \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} H_{z_w} \left(\frac{z_{res}-n \cdot z_p}{m} \right) f_{z_p}(z_p) dz_p \end{aligned} \quad (15)$$

式中: z_{res} 为新能源总出力; $F(z_{res})$ 为新能源总出力概率分布。

2) 源荷相关性场景生成方法。

基于上述新能源总出力概率分布 $F(z_{res})$ 和负荷的概率分布 $F(z_{load})$, 利用 Copula 函数建立源荷相关性模型。

$$h_{sl}(z_{res}, z_{load}) = c(F(z_{res}), F(z_{load})) \cdot f(z_{res}) f(z_{load}) \quad (16)$$

基于 2.2 节进行 Copula 函数优选得到最优 Copula 函数, 通过蒙特卡洛抽样即可得到考虑源荷相关性的出力场景:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{\text{res},1} & z_{\text{res},2} & \cdots & z_{\text{res},t} \\ z_{\text{load},1} & z_{\text{load},2} & \cdots & z_{\text{load},t} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中： $z_{\text{res},t}$ 为新能源在第 t 时刻的总出力； $z_{\text{load},t}$ 为负荷在第 t 时刻的总需求。

上述出力场景虽考虑了源荷相关性，但对于源荷出力的波动特性并未考虑，所生成的序列波动性仍存在较大误差，因此有必要对生成的序列进行波动特性修正。T-location 分布^[22]和正态分布分别能够较好拟合新能源出力波动性和负荷波动特性。

T-location 分布概率密度函数为：

$$f(\Delta z) = \frac{\Gamma\left(\frac{v+1}{2}\right)}{\sqrt{v\pi}\Gamma\left(\frac{v}{2}\right)} \left[1 + \frac{1}{v} \cdot \left(\frac{\Delta z - \mu}{\sigma}\right)^2\right]^{-\frac{v+1}{2}} \quad (18)$$

式中： v 、 μ 和 σ 分别为形状、位置和尺度参数。

基于历史数据可求取初始新能源波动概率分布，继而通过蒙特卡洛抽样可得到满足初始概率分布的源荷波动值 $\Delta z_{\text{res},t}$ 和 $\Delta z_{\text{load},t}$ ，将式 (16) 中的源荷序列进行波动性修正：

$$z_{\text{res},t+1} = z_{\text{res},t} + \Delta z_{\text{res},t} \quad (19)$$

$$z_{\text{load},t+1} = z_{\text{load},t} + \Delta z_{\text{load},t} \quad (20)$$

基于以上过程，遍历所有场景即可生成全年源荷相关性出力场景。将风光出力极小的场景作为极端场景，定义量化指标

$$r = \frac{\sum z_{\text{res}}}{\sum z_{\text{load}}} \quad (21)$$

式中： $\sum z_{\text{res}}$ 为一定时段内新能源出力之和； $\sum z_{\text{load}}$ 为一定时段内负荷需求之和。当 r 小于给定阈值时，此时新能源出力场景即为极端场景。

3 计及源荷匹配的新能源可信容量评估

3.1 可信容量指标

本文采用基于等效电量函数法^[23]的随机生产模拟进行可靠性指标的计算。其中，可靠性指标采用电量不足期望值（expected energy not supplied, EENS）和电力不足概率（loss of load probability, LOLP），即

$$E_{\text{ENS}} = \sum_{i \in S} D_i F_i T_i = \sum_{i \in S} D_i P_i T \quad (22)$$

$$L_{\text{OLP}} = \sum_{i \in S} \frac{t_i}{T} \quad (23)$$

式中： D_i 表示当系统为 i 状态下的概率值； S 为给定时间内系统无法满足负荷的所有状态； T 为时间（h）； P 为在状态 i 时系统甩负荷功率； F_i 为系统在 i 状态的频率值； T_i 为 i 状态存在时间。

基于上述可靠性指标，选用等效常规机组容量作为可信容量评估指标^[24]。

$$R_0(C_{\text{GEN1}}) = R_1(C_{\text{res}}, C_{\text{GEN2}}) \quad (24)$$

$$W_R = C_{\text{GEN1}} - C_{\text{GEN2}} \quad (25)$$

$$\eta = \frac{W_R}{C_{\text{res}}} \quad (26)$$

式中： $R_0(\cdot)$ 为新能源机组加入前系统可靠性指标； $R_1(\cdot)$ 为新能源机组加入后系统可靠性指标； C_{res} 为新能源装机容量； C_{GEN1} 为新能源机组加入前的常规机组容量； C_{GEN2} 为新能源机组加入后的常规机组容量； W_R 为可信容量指标； η 为新能源机组容量可信度。

3.2 可信容量计算方法

目前，可信容量的计算方法主要有二分法与弦截法。本文采用二分法作为可信容量的搜索方法，以计算 EENS 为例，主要过程如图 2 所示。

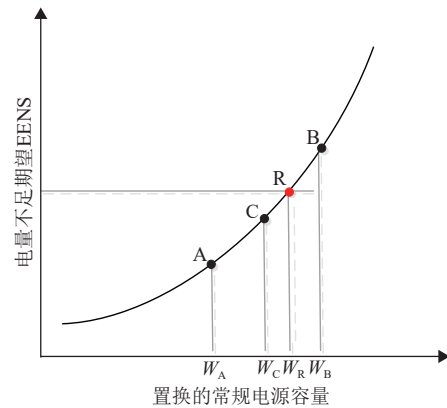


图 2 二分法迭代过程

Fig. 2 Dichotomy iterative process

在初始系统中加入一定容量的新能源机组，当容量为 W_R 的常规机组被置换出系统时，此时的发电系统可靠性指标与常规电源系统的相同，则认为新能源的可信容量是 W_R 。曲线上的 R 点可通过二分法迭代算出，图中 A 点和 B 点为初始点，分别位于 R 的两侧。在给定 A、B 的横坐标后，利用随机生产模拟方法计算 A、B 的纵坐标，即电量不足期望 EENS。

基于二分法迭代计算过程, 本文将新能源加入前后系统可靠性指标误差 γ 限制在一定范围内, 求得一定新能源装机情况下的可信容量指标:

$$R_0(C_{\text{GEN1}}) - R_1(C_{\text{res}}, C_{\text{GEN2}}) \leq \gamma \quad (27)$$

计及源荷匹配特性的新能源可信容量评估流程如图3所示。具体如下:

1) 根据负荷及机组数据, 计算初始系统中可靠性指标 E_{ENS} 及 L_{OLP} ;

2) 基于新能源出力实际数据, 构建新能源总出力的联合概率分布函数;

3) 构建源荷概率分布函数进行蒙特卡洛抽样及波动性修正, 生成源荷相关性出力场景;

4) 基于生成的源荷出力场景, 在可靠性指标满足给定阈值的前提下, 基于二分法迭代计算加入 C_{res} , 新能源机组后所置换出的可信容量 W_{R} 。

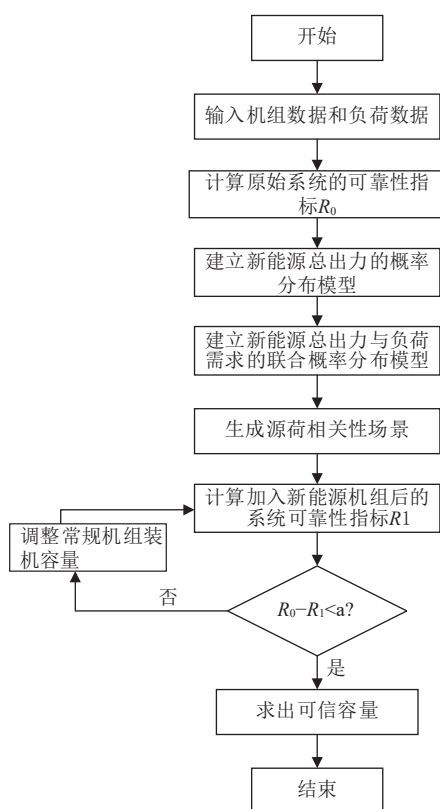


图3 可信容量评估流程图

Fig. 3 Flow chart of credible capacity assessment

4 算例分析

本文以某地区实际系统为算例, 该系统常规机组总装机容量 94024 MW, 最大用电负荷为 80522 MW。在该系统中加入风光机组, 额定装

机容量分别为 13210 MW 和 22250 MW, 新能源总装机容量 35460 MW, 风光装机占比为 1 : 1.68。

4.1 源荷场景生成

由于新能源出力与负荷在不同季节下具有不同的匹配特性, 本文将分季节进行源荷场景生成并合成新能源总出力曲线。以该地区夏季源荷场景生成为例, 原始数据中源荷 Kendall 相关性系数和 Spearman 相关性系数分别为 0.4855 和 0.6557, 具有一定的相关性。

基于风光出力历史数据构建的新能源总出力概率分布函数, 比较常用的 5 种 Copula 函数的相关参数及欧氏距离, 结果如表 1 所示。

表1 Copula 函数参数及欧氏距离指标

Table 1 Copula function parameters and Euclidean distance index

函数类型	模型参数	平方欧氏距离
Gaussian	-0.0440	0.0726
t	-0.2868	0.1815
Gumbel	1.0000	0.0625
Clayton	0.1573	0.0403
Frank	-1.1883	0.1397

根据表 1 结果, Clayton Copula 函数平方欧式距离最小, 拟合效果最好。基于该最优 Copula 函数进行蒙特卡洛抽样生成源荷场景, 生成序列 Kendall 相关性系数和 Spearman 相关性系数分别为 0.5121 和 0.6722, 与原始序列接近, 拟合效果较好。

4.2 可信容量评估结果分析

未加入新能源机组时, 原始系统可靠性指标 EENS 和 LOLP 分别为 42.1693 MW·h 和 0.00001065。根据本文所提新能源可信容量评估方法, 加入新能源机组后, 以实际历史数据作为基准值, 分别计算不考虑源荷匹配特性及考虑源荷匹配特性时的可信容量, 结算结果表 2 所示。

表2 系统可靠性指标及可信容量

Table 2 System reliability index and credible capacity

指标	基准值	不考虑源荷匹配	考虑源荷匹配
EENS/MWh	42.1693	42.1693	42.1693
LOLP	0.00001065	0.00001065	0.00001065
可信容量/MW	3821	3756	3837
可信度/%	10.77	10.59	10.82

由表 2 可得, 由于考虑源荷匹配特性时负荷的波动性由新能源出力承担一部分, 所以其可信

容量较不考虑源荷匹配特性时增加了 81 MW，计算结果较实际情况更为接近。可以看出，不考虑源荷匹配特性时可信容量评估结果偏于保守，而本文所提方法可以在一定程度上解决这一问题，即源荷匹配特性可以促进新能源消纳，提高新能源可信容量。

4.3 不同季节场景可信容量评估

根据新能源出力和负荷的历史数据，新能源四季场景下源荷匹配特性并不相同，本小节将研究不同季节场景下的可信容量，评估结果如表 3 所示。

表 3 不同季节场景下可信容量评估结果
Table 3 Results of credible capacity evaluation in different seasons

场景	一致性指标	可信容量/MW	可信度/%
春	1.2242	3378	9.5
夏	0.7805	5129	14.4
秋	0.8577	4085	13.6
冬	1.5292	3624	10.2

由表 3 可知，源荷匹配特性对新能源可信容量评估具有明显的影响，匹配特性较弱的春、冬两季可信容量较匹配特性强的夏、秋两季可信容量低。因此，本文提出的可信容量评估方法有利于准确评估不同季节场景下的可信容量，促进新能源消纳。

4.4 不同新能源装机比对可信容量的影响

在该系统中，维持常规电源装机容量不变，假设新能源总装机容量为 34000、38000 和 42000 MW，基于本文所提方法分别计算不同风光装机配比为 0.5、1、1.5 和 2 情况下的可信容量和可信度，计算结果如图 4 和图 5。

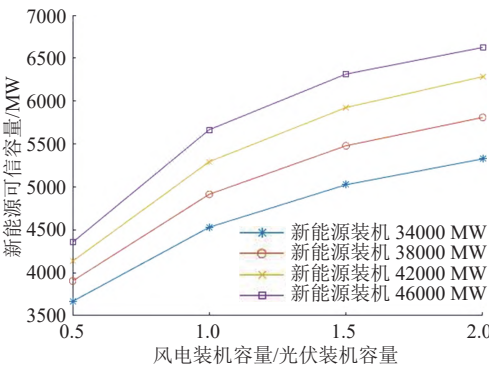


图 4 不同风光配比下的新能源可信容量

Fig. 4 Credible capacity of renewable energy under different wind and solar ratios

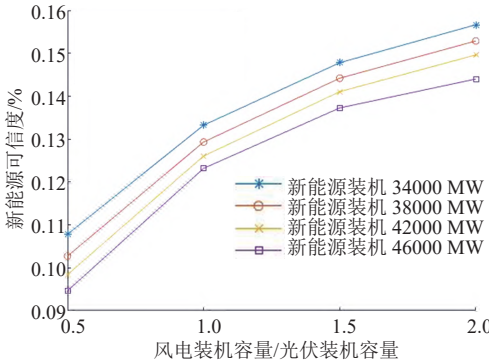


图 5 不同风光配比下的新能源可信度

Fig. 5 The credibility of renewable energy under different wind and solar ratios

图 4 和图 5 分别给出了不同风光配比下新能源可信容量和可信度，随着风光装机配比增大，不同新能源装机容量情况下新能源可信容量和可信度的变化趋势相同，均为不断增长。由计算结果可知，该区域内一定装机容量下，风电装机容量占比较高时可以提高可信容量，该地区风电对负荷的匹配程度较光伏高。但不排除受风光自然资源以及风光机组物理因素影响，某些区域风光装机比对可信容量评估结果的影响存在一定差异。

同一风光装机配比情况下，随着新能源装机容量的提高，新能源可信容量有所提高，但由于原始系统可靠性水平较高，系统对新能源消纳具有饱和作用，所以增长速度变缓。而可信度的变化趋势则与可信容量相反，随着装机规模的提高可信度下降。同一地区，风电和光伏出力对负荷的匹配程度有所不同，因此可信容量评估过程中有必要计及匹配特性以保证结果准确。

4.5 极端场景下的新能源可信容量评估

基于生成的源荷场景，设定阈值 r 为 0.002，分别选取满足给定阈值的风电极端场景、光伏极端场景以及风光极端场景进行可信容量评估，计算结果如表 4 所示。

由表 4 可得，新能源出力极端场景对其可信容量具有较为显著的影响。相较于光伏发电，风电极端场景较光伏极限场景下的可信容量更低，表明该地区风电出力对系统容量贡献效益更显著。而在风光均为极限极端场景时，可信容量下降到 159 MW，此时新能源对系统的发电容量的贡献降低到达到较低的水平，系统维持可靠性水平主要依赖于常规机组。因此，在电力规划时，有必要考虑新能源出力较低的极端场景，预留足够备

表4 极端场景下可信容量评估结果
Table 4 Credible capacity evaluation results in extreme scenarios

场景	风电极端场景	光伏极端场景	风光极端场景
EENS/MW·h	42.1693	42.1691	42.1694
可信容量/MW	2028	2337	159
可信度/%	5.7	6.5	0.0044

用, 以确保电力系统安全稳定运行。

5 结论

1) 源荷匹配特性对新能源可信容量评估具有一定的影响, 与不考虑源荷匹配特性的方法相比, 本文所提方法更加符合实际场景的计算结果。

2) 源荷匹配特性较强的季节场景, 其可信容量评估结果也较高, 说明源荷匹配特性是可信容量评估的关键因素, 进一步说明了本文所提方法的有效性。

3) 对于某一地区来说, 风光装机配比是新能源可信容量的关键影响因素, 在风资源丰富的地区, 风电装机容量占比较大时将提高新能源可信容量。

4) 对于某一特定系统, 由于系统对新能源消纳的饱和作用, 随着新能源总装机容量的提高, 可信容量增长, 而可信度不断下降。

5) 新能源极端出力场景对可信容量具有较为显著影响。极端场景下, 新能源可信容量较低, 其对系统容量贡献效益较差, 实际电力规划中, 应当对其加以考虑。

参考文献

- [1] 曹永吉, 张恒旭, 施啸寒, 等. 规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 1-8.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, SHI Xiaohan, *et al.* A preliminary study on the mechanism of large-scale distributed energy participating in the security and stability control of large power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 1-8(in Chinese).
- [2] 张恒旭, 曹永吉, 张怡, 等. 电力系统频率动态行为衍变与分析方法需求综述[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 42-52.
ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, *et al.* Review of frequency dynamic behavior evolution and analysis method requirements of power system[J]. Journal of Shan-

dong University (Engineering Science), 2021, 51(5): 42-52(in Chinese).

- [3] 姚越, 刘达. 基于注意力机制的卷积神经网络-长短期记忆网络的短期风电功率预测[J]. 现代电力, 2022, 39(2): 212-218.
YAO Yue, LIU Da. Short-term wind power forecasting based on attention mechanism of CNN-LSTM[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(2): 212-218(in Chinese).
- [4] 曹永吉, 张恒旭, 张怡, 等. 基于事件驱动的机组快速频率响应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 148-154.
CAO Yongji, ZHANG Hengxu, ZHANG Yi, *et al.* Fast frequency response control method for generating units based on event-driven[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 148-154(in Chinese).
- [5] ZHANG Hengxu, CAO Yongji, ZHANG Yi, *et al.* Quantitative synergy assessment of regional wind-solar energy resources based on MERRA reanalysis data[J]. Applied Energy, 2018, 216: 172-182.
- [6] 李树林, 戴嘉彤, 董海鹰, 等. 考虑相关性的风光抽蓄互补发电系统优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 92-102.
LI Shulin, DAI Jiatong, DONG Haiying, *et al.* Optimum operation of wind-solar pumped-storage complementary power generation system considering correlation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(11): 92-102(in Chinese).
- [7] 马燕峰, 李鑫, 刘金山, 等. 考虑风电场时空相关性的多场景优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 55-65.
MA Yanfeng, LI Xin, LIU Jinshan, *et al.* Multi-scenario optimal dispatch considering the temporal and spatial correlation of wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 55-65(in Chinese).
- [8] 张玥, 王秀丽, 曾平良, 等. 基于Copula理论考虑风电相关性的源网协调规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 102-108.
ZHANG Yue, WANG Xiuli, ZENG Pingliang, *et al.* Source network coordination planning considering wind power correlation based on Copula theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 102-108(in Chinese).
- [9] 赵书强, 金天然, 李志伟, 等. 考虑时空相关性的多风电场出力场景生成方法[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3997-4004.
ZHAO Shuqiang, JIN Tianran, LI Zhiwei, *et al.* Generation method of multi-wind farm output scenario considering spatio-temporal correlation[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3997-4004(in Chinese).
- [10] 夏冷风, 黎嘉明, 赵亮, 等. 考虑光伏电站时空相关性的光伏出力序列生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2017,

- 37(7): 1982–1993.
- XIA Lingfeng, LI Jiaming, ZHAO Liang, *et al.* A method for generating photovoltaic output sequence considering the temporal and spatial correlation of photovoltaic power plants[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(7): 1982–1993(in Chinese).
- [11] 梅光银, 龚锦霞, 郑元黎. 考虑风光出力相关性和碳排放限额的多能互补虚拟电厂的调度策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(8): 62–69.
- MEI Guangyin, GONG Jinxia, ZHENG Yuanli. Dispatching strategy of multi-energy complementary virtual power plant considering wind-solar output correlation and carbon emission limit[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(8): 62–69(in Chinese).
- [12] 王秀丽, 武泽辰, 曲翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(1): 15–21.
- WANG Xiuli, WU Zechen, QU Chong. Reliability analysis and confidence capacity calculation of photovoltaic power generation system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(1): 15–21(in Chinese).
- [13] DING Ming, XU Zhicheng. Empirical model for credible capacity evaluation of utility-scale PV plant[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(1): 94–103.
- [14] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 考虑风速变化特性的风电容量可信度评估方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(10): 18–27.
- LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, *et al.* The reliability assessment method of wind power capacity considering the characteristics of wind speed variation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(10): 18–27(in Chinese).
- [15] LIU Guanchi, VRAKOPOULOU M, MANCARELLA P. Assessment of the credible capacity of renewables and storage in multi-area power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2334–2344.
- [16] 蔡霖霖, 徐青山, 王旭东. 基于加速时序蒙特卡洛法的风电场置信容量评估[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(5): 86–93.
- CAI Jilin, XU Qingshan, WANG Xudong. Wind farm confidence capacity evaluation based on accelerated time series Monte Carlo method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(5): 86–93(in Chinese).
- [17] FENG Jiahuan, ZENG Bo, ZHAO Dongbo, *et al.* Evaluating demand response impacts on credible capacity of renewable distributed generation in smart distribution systems[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 14307–14317.
- [18] 严明辉, 潘舒宸, 吴滇宁, 等. 基于非参数核密度估计的电力市场用户电量异常数据辨识与修正方法[J]. *现代电力*, 2022, 39(1): 80–87.
- YAN Minghui, PAN Shuchen, WU Dianning, *et al.* An identification and correction method of abnormal data of electricity market consumers based on nonparametric kernel density estimation[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(1): 80–87(in Chinese).
- [19] AAS K, CZADO C, FRIGESSI A, *et al.* Pair-copula constructions of multiple dependence[J]. *Insurance: Mathematics and Economics*, 2009, 44(2): 182–198.
- [20] REMILLARD B, PAPAGEORGIOU N A, SOUSTRA F. Copula-based semiparametric models for multivariate time series[J]. *Journal of Multivariate Analysis*, 2012: 110.
- [21] 丁明, 宋晓皖, 孙磊, 等. 考虑时空相关性的多风电场出力场景生成与评价方法[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(10): 39–47.
- DING Ming, SONG Xiaowan, SUN Lei, *et al.* Generation and evaluation method of multi-wind farm output scenario considering spatio-temporal correlation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(10): 39–47(in Chinese).
- [22] 杨茂, 杜刚. 基于t Location-Scale分布的风电功率概率预测研究[J]. *中国电力*, 2017, 50(1): 140–145.
- YANG Mao, DU Gang. Research on probability prediction of wind power based on t Location-Scale distribution[J]. *Electric Power*, 2017, 50(1): 140–145(in Chinese).
- [23] CAI J, XU Q, WANG X, *et al.* Estimation for the capacity value of PV and wind plants considering output correlation[J]. *Energy Procedia*, 2017, 141: 55–60.
- [24] 李林川, 王锡凡, 王秀丽. 基于等效电量函数法的互联电力系统随机生产模拟[J]. *中国电机工程学报*, 1996(3): 180–184.
- LI Linchuan, WANG Xifan, WANG Xiuli. Stochastic production simulation of interconnected power system based on equivalent electric quantity function method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1996(3): 180–184(in Chinese).

收稿日期: 2022-02-16

作者简介:

赵龙(1977), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电网规划, E-mail: 63650828@qq.com;

李文升(1978), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为电网规划, E-mail: 1592209132@qq.com;

曹永吉(1992), 男, 博士后, 通信作者, 研究方向为电力系统频率稳定分析与控制、可再生能源并网及储能技术应用, E-mail: caoyong@dtu.dk;

张恒旭(1975), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统监测和电力系统数值仿真, E-mail: zhanghx@sdu.edu.cn;

米元泽(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划, E-mail: 1533319087@qq.com;

袁振华(1993), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电网规划, E-mail: 462004170@qq.com。