

基于出力特征的华东电网新能源统计学特性研究

李建华¹, 李成奥², 陆建宇¹, 许江蛟²

(1. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120; 2. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 可再生能源的迅速发展加快了新型电力系统的建设, 而新能源波动性强、随机性高等特点限制了智能电网的应用。鉴于华东电网呈现大受端、高密度、强耦合特性, 因此以其为例采用统计学方法分析该区域新能源资源特性。首先, 从供需平衡角度探讨新能源出力在不同参与度下的电网运行情况, 定量分析其对供电可靠性的影响。其次, 提出基于出力特征的精细化多尺度模型, 将出力同时率融入小时级、分钟级时间尺度, 揭示不同时空的新能源出力水平。再次, 建立网省站三级资源架构模型, 基于资源转移状态分析频率分布特征和时空相关性, 进而辨识新能源发电的延续性趋势。研究成果可为电网运行和电网规划提供重要依据。

关键词: 新能源; 资源特性; 统计学特征; 数据挖掘

中图分类号: TM743

文献标志码: A

DOI: 10.20204/j.sp.2025.07007

Research on Statistical Characteristics of Renewable Energy in East China Power Grid Based on Output Features

LI Jianhua¹, LI Chen'gao², LU Jianyu¹, XU Jiangjiao²

(1. East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China; 2. School of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The rapid development of renewable energy has accelerated the construction of the new power system. However, characteristics such as the strong volatility and high randomness of renewable energy limit the application of smart grids. Given that the East China Power Grid exhibits large power-receiving, high-density, and strongly coupled characteristics, it serves as an example for analyzing the resource characteristics of the renewable energy in this region using statistical methods. First, from the perspective of supply-demand balance, the grid operation under the different levels of renewable energy participation is explored, quantitatively analyzing its impact on power supply reliability. Second, a refined multi-scale model based on output features is proposed. This model integrates the output simultaneity rate into hourly and minute-level time scales, revealing the renewable energy output levels across different times and spaces. Third, a three-level resource architecture model (grid-province-station) is established. Based on resource transition states, the frequency distribution characteristics and spatiotemporal correlations are analyzed, thereby identifying the continuity trends of renewable energy power generation. The research findings can provide an important basis for power grid operation and planning.

Key words: renewable energy; resource characteristics; statistical characteristics; data mining

0 引言

构建新型电力系统能够服务“双碳”目标, 落实“减碳”设计要求, 以加速能源体系智慧化^[1]。高比例新能源保持着高速度发展、高比例利用、高质量消纳

的良好态势, 为保障电力供应、促进能源转型、扩大有效投资奠定了基础^[2]。截至 2024 年底, 华东电网区外直流容量 8.776×10^7 kW, 区内全口径风电、光伏新能源装机容量约 2.15×10^8 kW, 占华东电网全部供电电源(含直流)的 31%, 能源结构清洁化趋势明显^[3]。

伴随着大规模风电、光伏接入, 以及新能源出力历史数据的大量积累, 整理分析数据的相关工作已经展开, 基于出力特征的新能源纳入电网备用的研究方法也逐步加深^[4]。但由于风电、光伏等预测难度大, 使得出力与负荷难以协调, 对此类问题, 文献^[5]协调源荷侧需求响应, 考虑新能源场站的调节能力

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52377111); 国家电网有限公司华东分部科技项目(SGHD0000DKJS2400385)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52377111); Science and Technology Foundation of East China Branch of SGCC(SGHD0000DKJS2400385)

以优化资源配置。文献[6]探究了新能源出力波动的关联因素,对具体某时间段的出力水平进行了差异化分析。文献[7]基于供需平衡引入灵活性指标定量分析出力波动。文献[4-7]由于缺乏不同时间尺度下的精细化波动特征,没有研究风光资源特点与地理区位的关系。文献[8]结合统计学特性,分析了西北新能源在不同月份的出力和波动情况,对保供应、促消纳进行了研究。但是,不同地区出力的可靠性和波动特性只停留在季节时间尺度上,网省两级的新能源结构对于资源的分布特征缺乏支撑。文献[9]利用 Copula 函数探讨了风电场相邻日之间有功出力相关性。文献[10]提出了风电功率变化规律的年、月、日统计指标,从宁夏风电场的时间和空间轴上对风电功率变化量进行研究,并未对跨省场站进行分析。

另一方面,新能源的预测误差对电网的安全运行构成威胁。在如何保证供电可靠性方面,文献[11-14]从不同角度进行了探索。文献[11]通过对比实际和预测功率的边缘分布,提出功率预测的场景生成方法。文献[12]基于日前功率预测信息,评估计及多因素的风电消纳能力。文献[13]通过 TLS 分布建立风电预测误差概率模型,进行极大似然估计降低了出力不确定性从而减少弃风。文献[14]针对不同新能源预测对象、时间尺度分析了新能源的统计学特征。

文献[4-14]未从场站层面出发,未能有效分析不同地区的相关性,对新能源出力、波动和分布特征的研究不足。随着采样数据的积累,不同时间尺度下的波动规律更难掌握,从而限制了新能源在电网运行中的实际应用。本文在网省站三级出力数据支撑下,建立相邻日同时率分布模型、小时级分钟级精细化波动模型,深究华东新能源资源在电力保供方面的潜力,为新能源的精细化表征提供一种系统性参考思路。

1 新能源出力可靠性研究

保证出力指在一定的概率 $C\%$ 下,新能源能够保证的最低出力,其可作为该概率下新能源参与电力平衡的依据。供电保证率指在这一特定概率下,新能源资源所能达到的最小出力限度的概率,该概率下的出力值可以作为可靠性参考的出力指标,从而确保在此时间段内不会发生供电不足的情况。保证出力可以通过出力功率数据来统计。以华东地区电力系统新能源出力可靠性为研究对象,其出

力功率来源为调度管理系统。统计的历史新能源功率序列按矩阵排列,如式(1)所示。

$$P_a = \begin{bmatrix} P_{A_1 B_1} & P_{A_1 B_2} & \cdots & P_{A_1 B_m} \\ P_{A_2 B_1} & P_{A_2 B_2} & \cdots & P_{A_2 B_m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{A_n B_1} & P_{A_n B_2} & \cdots & P_{A_n B_m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: P_a 为历史新能源功率矩阵,升序序列 $P_a = \{P_{A_1 B_1}, P_{A_1 B_2}, P_{A_1 B_3}, \cdots, P_{A_n B_m}\}$, $\{P_{A_1 B_1} \leq P_{A_2 B_2} \leq P_{A_3 B_3} \leq \cdots \leq P_{A_n B_m}\}$, 矩阵行数 $\{A_1, A_2, \cdots, A_n\}$ 为统计数据的天数,矩阵列数 $\{B_1, B_2, \cdots, B_m\}$ 为 1 天中按时间分辨率统计的次数,每天按 15 min 分辨率的采样数收集新能源场站数据, n 为天数。

为了求取某概率 $C\%$ 下新能源的保证出力,需对新能源功率序列进行排列,其对应分位数 $N_{C\%}$ 如式(2)所示。

$$N_{C\%} = \max \{ \text{floor} [n \times (1 - C\%)], 1 \} \quad (2)$$

式中: n 为天数; $N_{C\%}$ 为 1 个整数,代表了某概率 $C\%$ 下新能源保证出力在整个序列中的分位数,满足 $1 \leq N_{C\%} \leq n$; floor 为向下取整函数。

按照分位数索引,从升序序列 P_a 中找出对应的数值,即为概率 $C\%$ 下的保证出力 P_g , 如式(3)所示。

$$P_g = P_a(N_{C\%}) \quad (3)$$

1.1 华东地区新能源出力水平分析

1.1.1 华东地区风电出力水平

华东地区 2021-2024 年风电保证出力分布如图 1 所示。横坐标 θ 为样本排序/总样本数,表示此出力在整个序列中的位置百分比,同下文图 2—图 4。由图 1 可知,近年风电的出力呈现相似的增长趋势,开始平缓增加至最后急剧上升;资源水平分布主要集中在序列中段,出力接近均值时变化较小;其他序列段变化较大。

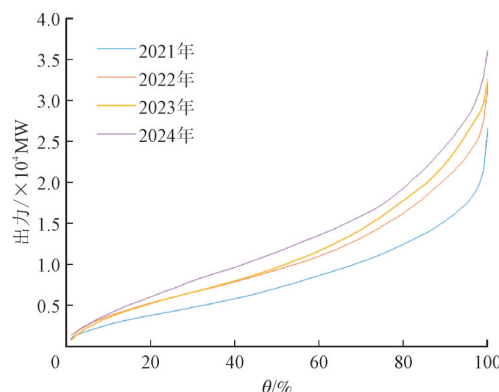


图1 华东地区近年风电保证出力分布

Fig.1 Distribution of guaranteed wind power output in East China in recent years

随着华东地区新能源装机容量的扩大,其风电

保证出力分布趋势呈现逐年增长,整体态势继续抬升。考虑到保证出力受资源与装机规模的共同影响,无法直观反映资源变化情况,因此采用保证出力同时率 λ_1 来分析资源的变化情况,如式(4)所示。

$$\lambda_1 = \frac{P_g}{C_z}$$

(4)

式中: C_z 为装机容量。

根据式(4)计算出华东地区4省1市的的同时率分布图如图2所示。由图2可知,上海市保证出力同时率与江苏省较为相似,安徽省与浙江省亦呈现相近规律,福建省风电保证出力同时率整体对电力系统的支撑能力显著优于其他省份。

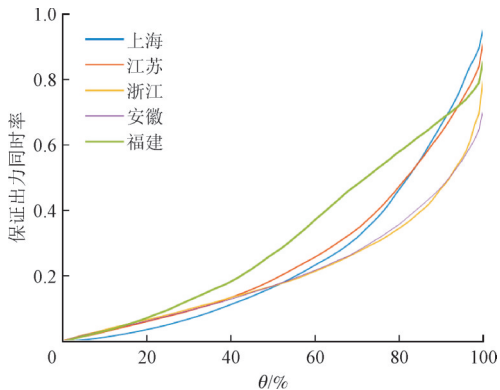


图2 华东地区4省1市风电保证出力同时率
Fig.2 Simultaneity rate of guaranteed wind power output in four provinces and one municipality of east China

对近年华东风电全时间段、早午高峰时段、晚高峰时段的出力水平进行分析,各时段在100%,95%,90%,85%,80%,75%保证率下的保证出力同时率,如表1—表4所示。

表1 不同保证率下2021年华东地区风电保证出力同时率
Table 1 Simultaneity rate of guaranteed wind power output in East China in 2021 under different assurance rates

项目	100%	95%	90%	85%	80%	75%
全时段	0.007	0.05	0.07	0.08	0.1	0.11
早午高峰	0.007	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08
晚高峰	0.01	0.06	0.08	0.1	0.11	0.12

表2 不同保证率下2022年华东地区风电保证出力同时率
Table 2 Simultaneity rate of guaranteed wind power output in East China in 2022 under different assurance rates

项目	100%	95%	90%	85%	80%	75%
全时段	0.01	0.06	0.09	0.11	0.13	0.14
早午高峰	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.1
晚高峰	0.03	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16

表3 不同保证率下2023年华东地区风电保证出力同时率
Table 3 Simultaneity rate of guaranteed wind power output in East China in 2023 under different assurance rates

项目	100%	95%	90%	85%	80%	75%
全时段	0.002	0.05	0.08	0.1	0.12	0.13
早午高峰	0.002	0.03	0.05	0.07	0.08	0.11
晚高峰	0.02	0.07	0.1	0.12	0.14	0.16

表4 不同保证率下2024年华东地区风电保证出力同时率
Table 4 Simultaneity rate of guaranteed wind power output in East China in 2024 under different assurance rates

项目	100%	95%	90%	85%	80%	75%
全时段	0.003	0.05	0.08	0.1	0.12	0.14
早午高峰	0.004	0.02	0.05	0.07	0.08	0.1
晚高峰	0.01	0.07	0.1	0.12	0.15	0.17

比较各年份的保证出力同时率,2022年风电资源优于其他年份,整体出力水平更高。保证出力同时率在晚高峰时段通常高于其他时段,也体现了风资源的反调峰特性。华东电网在各保证率下,应该采用同时率更低的时段以确保不会出现供电缺口,保障供电安全。

1.1.2 华东地区光伏出力水平

华东2021—2024年光伏保证出力分布如图3所示,由于光伏具有时效性,图3的样本序列后半段显示出光伏出力分布水平。由图3可知,光伏出力急剧上升,与光伏装机容量扩大相吻合,相比风电出力光伏整体出力规律明显可循。

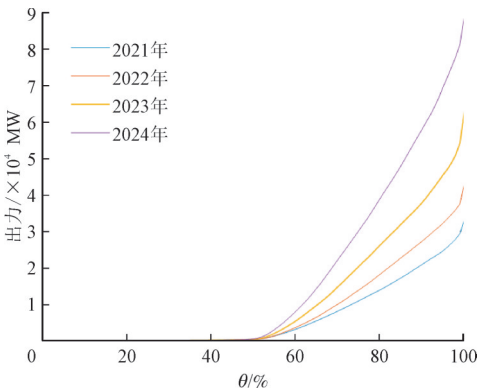


图3 华东地区近年光伏保证出力分布图
Fig.3 Distribution of guaranteed PV power output in East China in recent years

基于华东光伏数据绘制各省份光伏同时率分布如图4所示。由图4可知,在负荷晚高峰时段光伏出力基本为0,而在早、午高峰时段,江苏、安徽、上海等地的光伏保证同时率峰值均维持在0.7左右,福建地区的光伏早午高峰同时率较低。且光伏发电具有较风电更为显著的规律性,且在早午高峰时段的光伏利用率明显优于风电利用率。

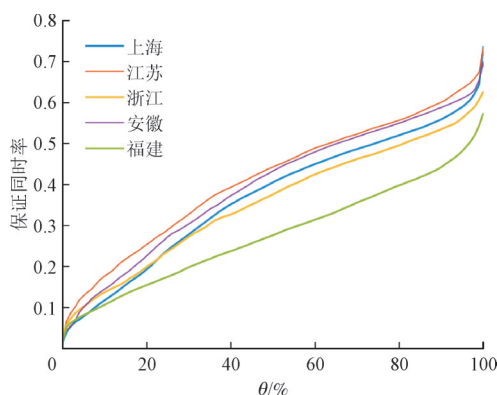


图4 华东地区4省1市光伏早午高峰同时率

Fig.4 Simultaneity rate during morning and noon peak for solar PV in four provinces and one municipality of East China

1.2 考虑统计学特性的供电可靠性分析

华东地区早午高峰不同保证率下的供电可靠性按照不同保证率参与情况下的新能源出力来调节电网运行平衡,可定量分析新能源出力与负荷的拟合程度。例如在2023年5月的早午高峰时段,随着保证率的升高新能源出力水平随之降低,供电缺口数量则急剧上升。由图5可以看出89%的保证率是可靠的,可保证供电安全。电力供需平衡方程为:

$$P_l + P_g + P_r = L_t \quad (5)$$

式中: P_l 为系统常规机组出力; P_r 为系统其他可用出力; L_t 为系统所需负荷。

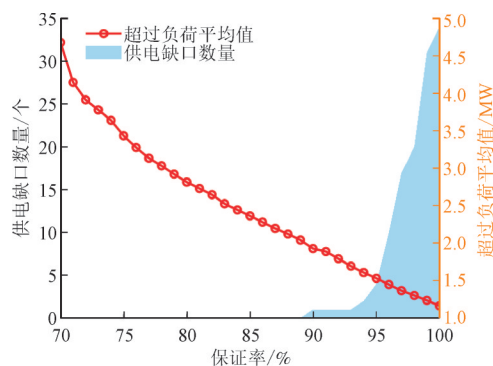


图5 华东地区早午高峰不同保证率下的供电可靠性

Fig.5 Power supply reliability under different guarantee rates during morning and noon peak in East China

华东地区晚高峰不同保证率下的供电可靠性如图6所示,由图6可知,在晚高峰时段,保证率需要进一步降低才能满足负荷的需求,因为在晚高峰时段,新能源出力主要由风电承担;而在早午高峰时段通常既有风力发电又有光伏出力的支援,所以晚高峰需要在更低保证率下保障供电安全。

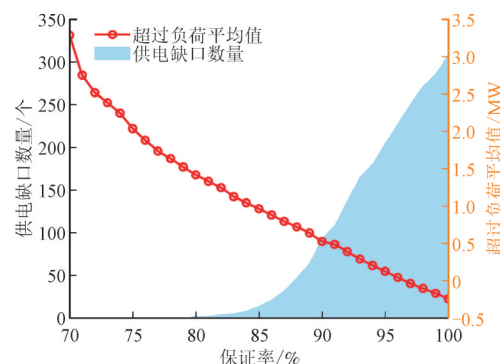


图6 华东地区晚高峰不同保证率下的供电可靠性

Fig.6 Power supply reliability under different guarantee rates during evening peak in East China

2 不同时间尺度下新能源波动特性分析

新能源资源的波动特性分析可以对电力生产、电力调度起到指导作用。为深入挖掘新能源资源特性,减少其他因素对波动特性的影响,直观反映新能源资源利用情况,本文对相邻日同时率和相邻日同时率年均值的波动情况进行分析,具体包括相邻同时率月平均波动特性以及3年内每月的最大出力波动特性、月平均波动图、月最小波动图。

$$\beta_t = \frac{\overline{P_a}}{C_z} \quad (6)$$

$$\beta_y = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_t}{N} \quad (7)$$

式中: β_t, β_y 分别为相邻日同时率与相邻日同时率年均值,无量纲; $\overline{P_a}$ 为日平均出力; N 为全年总天数。

2.1 月尺度波动特性

逐月分析出力数据,其分布如图7所示。在经过8月、9月夏季风资源枯竭阶段后,风资源于11月显著回升,达到了全年最为丰富的月份;2023年秋季则处于风资源的过渡期,同时率波动从10月的0.21过渡至11月的0.34,华东地区冬季风资源更为丰富,波动情况也更为剧烈。7月因台风登陆福建导致风电波动变化较大,同时率波动达到了0.09。

月出力波动如图8所示。2023年8月的月平均出力为全年最小即6704.19 MW,11月的平均出力为全年最大即15437.5 MW;往年出力数据显示,8月的月平均出力为全年最小即7099.44 MW,12月的月平均出力为全年最大即13690.4 MW。伴随着新能源装机容量的不断扩大,波动幅度也会更加明显。

月尺度波动受极端天气影响,风电波动幅度显著,建议在灾害高发季节增加灵活性资源调配方案。

光伏月度波动情况如图9所示。各月的波动幅度相较于风电更为稳定,资源过度亦更为平缓。

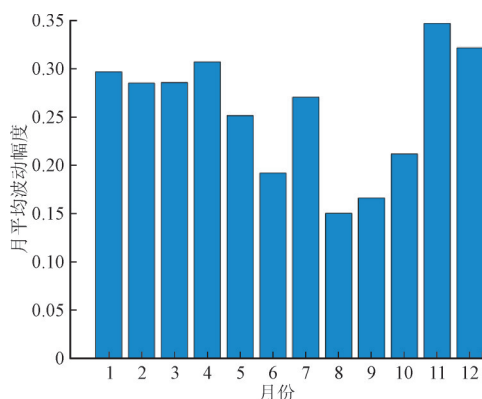


图7 2023年华东地区风电相邻日同时率月平均波动
Fig.7 Monthly average fluctuation of adjacent-day simultaneity rate for wind power in East China in 2023

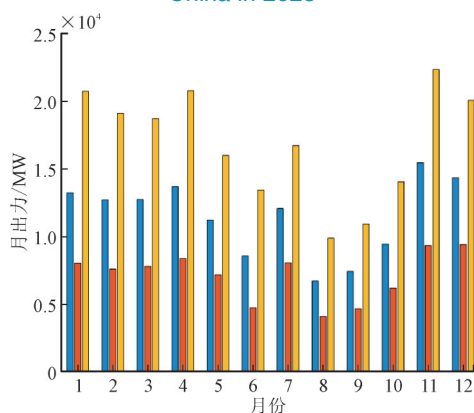


图8 2023年华东地区风电月平均出力波动
Fig.8 Monthly average output fluctuation of wind power in East China in 2023

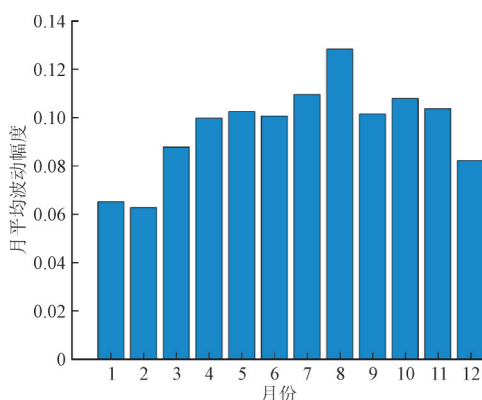


图9 2023年华东地区光伏相邻日同时率月平均波动
Fig.9 Monthly average fluctuation of adjacent-day simultaneity rate for PV in East China in 2023

由图9可知,光伏出力最大波动出现在8月向9月、11月向1月的过渡中,波动幅度为0.03。当转入冬季时,光伏发电量会有明显下跌但年最大波动幅度不超过0.05。

2.2 日内分钟级、小时级波动特性

统计分钟级、小时级的波动情况,可以在不同程度上反应资源的变化状态。图10将上海1d中不同时间点的出力同时率进行集成,波动主要出现在16:00—17:00时段,其中早高峰时段由强转弱波动并不明显,在午高峰时段即13:00左右波动最小,晚高峰时段由弱变强,通常在20:00左右波动最大,波动幅度在0.1左右。

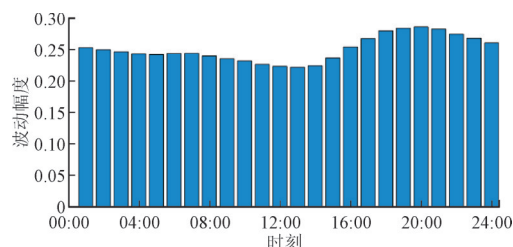


图10 2023年上海风电在不同小时级的波动情况
Fig.10 Hourly-level fluctuation of wind power in Shanghai in 2023

基于华东地区常见波动特征归纳出3种典型日波动模式如图11。第1种典型日在早午高峰时段波动;第2种典型日在晚高峰时段波动;第3种典型日于正午时段波动最为剧烈。

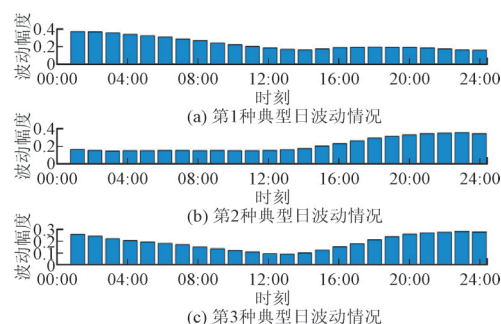


图11 上海3种典型日波动情况
Fig.11 Fluctuation profiles of three typical days in Shanghai

选取第1种典型日波动情况为例,按出力数据绘制分钟级波动曲线,如图12所示。上海整体出力水平不高,在短时间内出力功率发生大幅度单向变化的只有8:30—16:00。

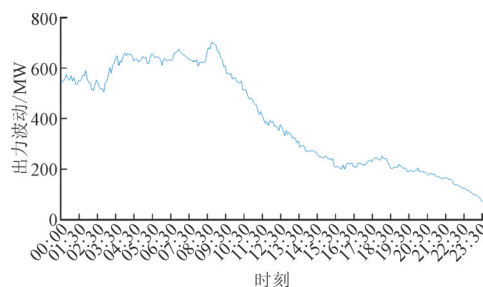


图12 2023年12月1日典型日的分钟级波动情况
Fig.12 Typical day minute-level fluctuation on December 1, 2023

3 网省站三级新能源频率分布特征和时空相关性分析

统计华东地区新能源不同资源等级分布的频率,以更好分析次日新能源资源的过渡情况,总结时空相关性特征。本文建立模型之前,先对网省站三级出力数据进行分类,然后分析不同时间、不同地点出力类别之间的分布情况,最后进行时空转移的研究。

本文对出力进行归一化操作,以装机容量为基准值,将出力水平转化为标么值,更加直观地分析新能源转移特性;再根据新能源出力由低到高分别为 A, B, C, D 4 类,即代表低、中、较高、高出力。

3.1 频率分布特征分析

基于近年历史数据,构建风光资源跨日转移频率的统计学模型,表征风光资源的频率分布特征规律。

基于统计学建立风光资源跨日转移分布模型:

$$L_B^A = \frac{M_B^A}{M_{\text{total}}} \quad (8)$$

式中: L_B^A 为相邻日新能源资源频率分布, A 和 B 分别代表相邻日前后 2 d 的新能源资源等级; M_B^A 为统计样本中相邻日新能源资源等级从 A→B 资源分布的天数; M_{total} 为统计样本中的总天数。

图 13 所示的频率分布图展示了不同转移类型的具体分布特征。各转移类型主要表现为相同出力水平间的相互转移,其中低出力至低出力和高出力至高出力的转移频率最为显著。相邻等级出力类型间的转移也较为普遍,表明低出力资源和高出力资源具有较好的持续性。低出力与高出力资源间的相互转化在所有类型中仅占 1.4% 和 1.7%,即风资源发生突变的概率极低。此外,低出力与较高出力水平 A→C, C→A 以及中出力与高出力水平 B→D, D→B 的相互转化频率相近,且在所有转移类型中均属较少见情况。

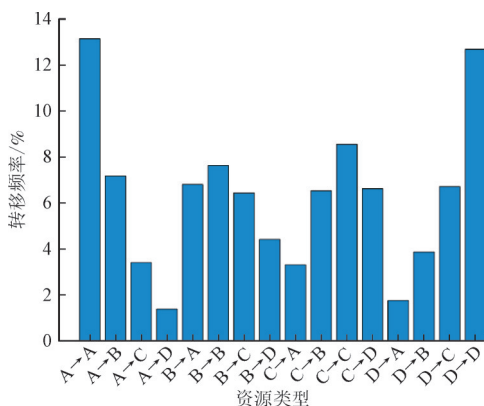


图 13 华东地区风资源频率分布

Fig.13 Frequency distribution of wind resources in East China

华东地区光资源时间转移特性如图 14 所示。由图 14 可知,光照过程整体过渡平稳,光资源延续性较高;在各种可能的前后日转移中,均以相同等级和相邻等级为主。

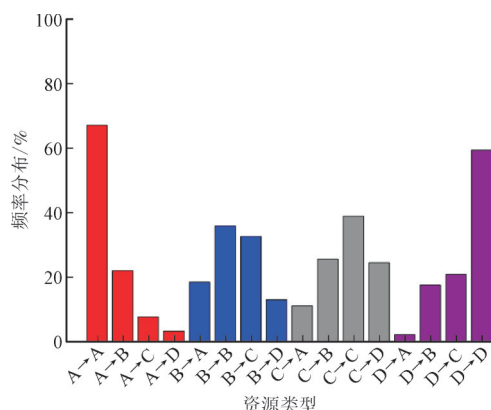


图 14 华东地区光伏不同资源等级之间转移分布

Fig.14 Transition distribution between different PV resource grades in East China

3.2 资源延续性分析

以大风 D 级作为基准日,根据资源转移概率分布图可计算得,大风天一般持续 2 d。1 d 后由 D 级转移至 D 级风资源充足的概率为 50.7%,转移至 C 级较强出力的概率为 26.8%;2 d 后为 D 级的概率为 32.7%,转移至 C 级的概率为 22.6%;3 d 后风资源转移至 D 级资源丰富的概率为 22.5%,转移至 C 级的概率为 16.6%。

以光照资源足够充足的 D 级作为基准日,根据光伏资源转移概率分布图可计算得,光伏高出力一般持续 3 d。1 d 后由 D 级转移至 D 级光资源充足的概率为 59.3%,转移至 C 级的概率为 20.9%;2 d 后为 D 级的概率为 40.3%,转移至 C 级的概率为 20.5%;3 d 后光伏资源仍为 D 的概率为 28.9%,转移至 C 的概率为 16.5%。

3.3 时空转移概率分析

根据统计学模型建立上海、江苏、浙江、安徽、福建各省场站点当日及前后 2 d 风光资源分布概率模型,得到某省某日及前后 2 d 风光资源情况。即量化的表示在某日某省风光资源等级为 D 时,另一省该日及前后 2 d 风光资源为其他等级的概率,从而分析华东各省风光资源在空间上的关联性。

基于统计学建立各省地区当日及前后 2 d 风资源分布的条件概率模型为:

$$L_B^D(K|P) = \frac{L_B^K}{L_D^P} \quad (9)$$

式中: $L_B^D(KIP)$ 为在某日P省风资源等级为D时,K省当日及前后2日风资源等级为B的概率; L_B^K 代表K省某日风资源等级为B的概率。

在不考虑具体场站数据时,省份的资源径向不明,从主网-省网的2级出力数据难以发掘出具体的关联性,因此加入场站级的数据。选取的出力数据应尽可能分散以减少地理集中性对出力相似性的干扰。

上海场站风资源等级为D时各省当日及前后2d风资源等级为D的概率如表5所示。其中,T-2,T-1,T-0,T+1,T+2分别表示前日、昨日、今日、明日、后日。由表5可知,当上海风资源等级为D级时,浙江和福建风资源转移至D级的概率逐渐增大,表明上海起风后将会带动浙江和福建风资源的好转。

表5 上海场站风资源等级为D时各省当日及前后2d风资源等级为D的概率

Table 5 Probability of wind resource level D in each province on the same day and two adjacent days when Shanghai station wind resource level is D %

地区	T-2 日	T-1 日	T-0 日	T+1 日	T+2 日
江苏场站	34.07	49.45	49.45	34.07	21.98
浙江场站	26.37	27.47	32.97	38.46	38.46
安徽场站	34.07	38.46	41.76	34.07	25.27
福建场站	16.48	21.98	26.37	38.46	34.07

江苏场站风资源为D时各省当日及前后2日风资源为D的概率如表6所示。由表6可知,当江苏风资源等级为D时,上海、浙江、福建3个地区的风资源等级在后面2d内相继达到最大。

表6 江苏场站风资源等级为D时各省当日及前后2d风资源等级为D的概率

Table 6 Probability of wind resource level D in each province on the same day and two adjacent days when Jiangsu station wind resource level is D %

地区	T-2 日	T-1 日	T-0 日	T+1 日	T+2 日
上海场站	21.98	34.07	49.45	49.45	34.07
浙江场站	24.18	19.78	23.08	25.27	29.67
安徽场站	29.67	46.15	54.95	40.66	32.97
福建场站	19.78	18.68	17.58	26.37	29.67

浙江、安徽、福建场站风资源等级为D时各省当日及前后2d风资源等级为D的概率如表7-表9所示。由表7-表9可知,其概率数据表明了安徽的风资源在T+1天转移至浙江,由此可见华东地区风资源流动径向主要由江苏南下转移至福建。

表7 浙江场站风资源等级为D时各省当日及前后2d风资源等级为D的概率

Table 7 Probability of wind resource level D in each province on the same day and two adjacent days when Zhejiang station wind resource level is D %

地区	T-2 日	T-1 日	T-0 日	T+1 日	T+2 日
上海场站	38.46	38.46	32.97	27.47	26.37
江苏场站	29.67	25.27	23.08	19.78	24.18
安徽场站	31.87	35.16	29.67	26.37	21.98
福建场站	39.56	40.66	48.35	46.15	37.36

表8 安徽场站风资源等级为D时各省当日及前后2d风资源等级为D的概率

Table 8 Probability of wind resource level D in each province on the same day and two adjacent days when Anhui station wind resource level is D %

地区	T-2 日	T-1 日	T-0 日	T+1 日	T+2 日
上海场站	25.27	34.07	41.76	38.46	34.07
江苏场站	32.97	40.66	54.95	46.15	29.67
浙江场站	21.98	26.37	29.67	35.16	31.87
福建场站	19.78	18.68	18.68	21.98	20.88

表9 福建场站风资源等级为D时各省当日及前后2d风资源等级为D的概率

Table 9 Probability of wind resource level D in each province on the same day and two adjacent days when Fujian station wind resource level is D %

地区	T-2 日	T-1 日	T-0 日	T+1 日	T+2 日
上海场站	34.07	38.46	26.37	21.98	16.48
江苏场站	29.67	26.37	17.58	18.68	19.78
浙江场站	37.36	46.15	48.35	40.66	39.56
安徽场站	20.88	21.98	18.68	18.68	19.78

江苏、上海和安徽3个地区同时出现D级资源等级的概率比较高,风资源的同步性较强。不仅是因为这2省1市的地理位置接壤,当风资源整体流向华东地区时,浙江和福建由于受地理位置影响相对其他地方比较滞后,其资源特征具有相对独立性。地理分布与气象系统具有耦合效应,结论可提升华东地区新能源整体消纳能力,为跨省电力支援提供理论依据。

4 结语

本文通过统计学模型对出力数据进行进一步挖掘,实现了对风电、光伏的可视化解构,揭示了华东新能源出力的内在规律,为电网的精细化调度与规划提供了参考依据。主要结论如下:

1)在晚高峰时段,风电通常需采用较低的保证率以满足负荷需求,而早午高峰因风光互补效应可适当提高保证率,供电安全阈值的确定为华东电网的资源配置提供了量化依据。

2)夏季受极端天气影响,风电波动幅度的显著,而光伏较为平稳,建议在灾害高发季节增加灵活性资

源调配。分钟级、小时级时间精细化波动表明,风电波动在主要在夜间,光伏波动在午间辐照变化时段。

3) 华东地区风资源不会突变且一般持续 2 d 左右,光伏高出力时段一般持续 3 d。风资源流动路径主要由北向南贯穿,江苏-福建资源传递滞后性明显。

值得注意的是,本文只考虑了新能源出力的统计学特性,并没有考虑负荷的相关特性;同时,极端天气下出力具有更强的不确定性,如何利用统计学特征进一步分析需要深入研究。

参考文献

- [1] 任大伟,肖晋宇,侯金鸣,等.双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J].电网技术,2022,46(10):3831-3839.
REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Research on the construction and evolution of China's new power system under the dual-carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and development challenges of high percentage renewable energy power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 黄效喜,桑姐,徐玲君.华东地区风光储蓄协调运行研究[J].电力与能源,2020,41(1):87-90.
HUANG Xiaoxi, SAN Da, XU Lingjun. Research on coordinated operation of wind-solar savings in East China[J]. Power and Energy, 2020, 41(1): 87-90.
- [4] 黄瀚燕.考虑大规模风电接入的电力系统备用确定方法研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [5] 崔杨,张家瑞,仲悟之,等.考虑源-荷多时间尺度协调优化的大规模风电接入多源电力系统调度策略[J].电网技术,2021,45(5):1828-1837.
CUI Yang, ZHANG Jiarui, ZHONG Wuzhi, et al. Scheduling strategy for large-scale wind power access to multi-source power systems considering source-load multi-timescale coordinated optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1828-1837.
- [6] 王建学,张耀,万筱钟,等.面向电网运行的新能源出力特性指标体系研究——风电出力特性指标体系[J].电网与清洁能源,2016,32(2):42-51,57.
WANG Jianxue, ZHANG Yao, WAN Xiaozhong, et al. Research on new energy output characteristic index system for grid operation—wind power output characteristic index system[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 42-51, 57.
- [7] 葛朝晖,张倩茅,齐晓光,等.考虑灵活性需求的可再生能源出力特性指标体系[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(7):30-37.
GE Zhaohui, ZHANG Qianmao, QI Xiaoguang, et al. Renewable energy output characteristic index system considering flexibility demand[J]. Proceedings of the CSO-EPSA, 2018, 30(7): 30-37.
- [8] 向昇,金吉良,赵鑫,等.基于统计学特征的西北电网新能源资源特性分析[J].电网与清洁能源,2023,39(1):120-127.
XIANG Yi, JIN Jiliang, ZHAO Xin, et al. Characterization of new energy resources in Northwest power grid based on statistical characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 120-127.
- [9] 吕思潼,李建国,郭永鑫,等.基于实测数据的风电场相邻日有功出力相关性研究[J].智慧电力,2020,48(5):47-52,79.
LYU Sitong, LI Jianguo, GUO Yongxin, et al. Study on the correlation of adjacent daily active output of wind farms based on measured data[J]. Smart Power, 2020, 48(5): 47-52, 79.
- [10] 项丽,常康,李笑宇,等.宁夏风电出力时空特性研究[J].陕西电力,2011,39(12):43-49.
XIANG Li, CHANG Kang, LI Xiaoyu, et al. Study on spatial and temporal characteristics of wind power output in Ningxia[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 39(12): 43-49.
- [11] 孙晓强,马晓伟,张小奇,等.基于相依关系的新能源功率预测场景生成及调度应用[J].电力系统自动化,2019,43(15):10-17,44.
SUN Xiaoliang, MA Xiaowei, ZHANG Xiaoqi, et al. New energy power prediction scenario generation and scheduling application based on dependencies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 10-17, 44.
- [12] 贾文昭,康重庆,李丹,等.基于日前风功率预测的风电消纳能力评估方法[J].电网技术,2012,36(8):69-75.
JIA Wenzhao, KANG Chongqing, LI Dan, et al. Assessment method of wind power consumption capacity based on day-ahead wind power prediction[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 69-75.
- [13] 兑潇玮,朱桂萍,刘艳章.考虑预测误差的风电场储能配置优化方法[J].电网技术,2017,41(2):434-439.
DUI Xiaowei, ZHU Guiping, LIU Yanzhang. Optimization method of wind farm energy storage allocation considering forecast error[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 434-439.
- [14] 万灿,宋永华.新能源电力系统概率预测理论与方法及其应用[J].电力系统自动化,2021,45(1):2-16.
WAN Can, SONG Yonghua. Theory and method of probabilistic prediction of new energy power system and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 2-16.
- [15] HOU Q C, DU E S, ZHANG N, et al. Impact of high renewable penetration on the power system operation mode: a data-driven approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 731-741.
- [16] LI P, YANG M, WU QW. Confidence interval based distributionally robust real-time economic dispatch approach considering wind power accommodation risk[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 58-69.
- [17] 张振宇,王文倬,马晓伟,等.基于风险控制的新能源纳入电力系统备用方法[J].电网技术,2020,44(9):3375-3382.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, MA Xiaowei, et al. Reserve of power system considering renewable energy based on risk control [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3375-3382.
- [18] 吕循岩,肖晋宇,侯金鸣,等.连续多日低风速事件的时空分布特性及对电力供应影响初探[J].电力系统自动化,2025,49(4):79-89.
LYU Xunyan, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of consecutive multi-day low wind speed events and their impact on power supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 79-89.
- [19] 程林,何剑.电力系统可靠性原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2015:2.
- [20] 刘天琪.现代电力系统分析理论与方法[M].北京:中国电力出版社,2016:129-130.
- [21] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.电力系统技术导则:GB/T 38969—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期:2025-01-21; 修改日期:2025-05-15

作者简介:李建华(1978),男,江苏无锡人,硕士,高级工程师,主要从事大电网运行控制和仿真计算。E-mail:li_jianhua@ec.sgcc.com.cn
许江蛟(1988),男,通信作者,浙江湖州人,博士,讲师,主要研究方向为新能源预测、需求侧能源管理等。E-mail:jiangjiao.xu@shiep.edu.cn