

# 考虑多时间尺度的新能源特性对地区电网的影响评估

章雪萌<sup>1,✉</sup>, 孟祥娟<sup>2</sup>, 毛福斌<sup>1</sup>, 李玉良<sup>2</sup>, 陈凡<sup>3</sup>

(1. 安徽省能源研究院, 安徽合肥 230051; 2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽合肥 230601;  
3. 国网安徽省电力有限公司, 安徽合肥 230022)

**摘要:** [目的] 随着新能源的发展, 新能源不确定性和时段特征对电网的影响日增, 传统的新能源指标难以刻画电网与新能源的交互关系, 需要建立评估体系和指标来量化新能源对电网的影响。[方法] 从多维度、多尺度构建评估体系, 建立新能源出力特性指标、电量特性指标、调峰特性指标和灵活性需求指标, 分析电网关键时刻新能源出力特性、新能源出力与电量的关系、新能源对调峰的影响和新能源波动性对电网的影响, 通过应用不同时间尺度(年、季、月、日和小时)的指标来挖掘典型场景特征。[结果] 以某地区实际风光荷情况为例, 进行评估体系的各类指标计算, 结果定量显示了地区新能源对电网的影响和在不同时间尺度的分布特性, 验证了所提指标体系的工程实用性。[结论] 所提指标计算方法快速简明, 指标物理意义清晰直观, 有利于指导新能源的规划和调度运行。

**关键词:** 风电; 光伏; 指标体系; 调峰; 灵活性; 数据挖掘

中图分类号: TM7; TM715

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0166-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Impact Assessment of New Energy Characteristics on Regional Power Grid Considering Multiple Time Scales

ZHANG Xuemeng<sup>1,✉</sup>, MENG Xiangjuan<sup>2</sup>, MAO Fubin<sup>1</sup>, LI Yuliang<sup>2</sup>, CHEN Fan<sup>3</sup>

(1. Anhui Energy Research Institute Co., Ltd., Hefei 230051, Anhui, China; 2. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui, China; 3. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, Anhui, China)

**Abstract:** [Introduction] With the development of new energy, the influence of new energy uncertainty and time characteristics on power grid is increasing day by day. Traditional new energy indexes are difficult to describe the interaction between power grid and new energy. It is necessary to establish evaluation system and index to quantify the impact of new energy on power grid. [Method] Construct the evaluation system from multi-dimensional and multi-scale and establish new energy output characteristic index, electric quantity characteristic index, peak regulation characteristic index and flexibility demand index to analyze the new energy output characteristics, the relationship between new energy output and electric quantity, the influence of new energy on peak regulation and the influence of new energy fluctuation on power grid at critical moments. Typical scene features were mined by applying indexes from different time scales such as year, season, month, day and hour. [Result] All kinds of indexes of the evaluation system has been calculated by taking the actual wind power, PV power and load in a certain area as an example. The results show quantitatively the influence of regional new energy on power grid and its distribution characteristics at different time scales. The engineering practicability of the proposed index system is verified. [Conclusion] The proposed index calculation method is quick and simple and the physical meaning of indexes is clear and intuitive and helpful to guide the planning and dispatching of new energy.

**Key words:** wind power; photovoltaic power; index system; peak regulation; flexibility; data mining

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-10-27 修回日期: 2023-01-11

基金项目: 国网安徽省电力公司科技项目“机理与数据联合驱动的新能源发电预测技术研究”(52120522000R)

## 0 引言

实现“碳达峰”和“碳中和”是当今国际社会能源发展已达成的共识,我国近期提出“双碳”目标,2030年风电、太阳能总装机容量将达到1.2GW以上<sup>[1]</sup>。对我国而言,改变以煤炭为主的高碳能源电力结构转型为以清洁能源为主的新型电力系统是实现可持续发展的必由之路,推动能源低碳转型,关键是加快发展风电、太阳能等新能源。

随着新能源的快速发展,电力系统呈现“双高”特征,新能源出力的波动性、间歇性和随机性给电网规划及运行带来新的挑战。研究新能源出力特性是一项重要工作,已有学者从不同角度进行研究。在风电特性的分析方面,文献[2]用风电出力变化率等指标表征风电自然特性,用风电穿透率、风电调峰特性指标等指标描述风电与电网交互影响。文献[3]用峰谷时段风电出力中位数差反映风电调峰特性。在光伏特性分析方面,文献[4]提出用“光伏出力季节属性”“平均出力”和“全日最大出力”3个指标来评估光伏出力特性。文献[5]提出3种概率性负荷特性指标,用蒙特卡洛模拟法评估不同渗透率的光伏接入对配电网负荷特性的影响。在新能源特性的综合评估方面,文献[6]提出用来表征新能源的年特性、季特性及日特性的指标。文献[7]提出由净负荷时序爬坡功率与机组爬坡功率阈值之差作为灵活性需求指标来定量描述新能源波动对电网的影响。文献[8]用时间序列的方法分析新能源-负荷特性,用源荷相似性距离描述作为新能源-负荷特性指标描述电力曲线特征。从时间尺度的研究方面,文献[9]基于不同时间尺度分析风电波动特性,在日时间尺度提出六种风电典型波动类型划分方法。文献[10]基于光伏电站运行数据,分析了不同时间尺度的光伏出力波动特性。从实际数据的分析研究方面,文献[11-12]分别对江苏和青海的风电场和光伏电站实际出力特性进行统计分析。文献[13-14]分别分析了内蒙古新能源和湖南新能源对电网的调峰影响。

然而,上述研究虽各有重点,但没有聚焦于多维度、多尺度综合评估新能源与电网的交互影响,有些评估指标和方法有着严谨的理论基础,但很难大规模应用于评估全网的计算,例如蒙特卡洛法<sup>[5]</sup>要提高指标精度需计算大量抽样样本,计算时间长,收敛

速度慢;时间序列法<sup>[8]</sup>需逐条对两条时间序列进行对比分析,应用场景相对局限。对于电力系统从业人员更关心新能源对电网的影响,以及简明、直观、可利用性强的指标用于实际计算和特性分析。

鉴于以上分析,文章从电网规划和运行的实际工作需求出发,构建评估新能源对电网影响的指标评估体系,提出4类指标即表征电网关键时刻新能源出力特性指标,新能源电量指标,调峰特性指标和灵活性指标,适用于从不同时间尺度评估不同场景新能源对电网的影响,可推广应用于新能源输电规划、接入系统,储能规划等实际工程中,对电网的安全稳定运行提供指标参考。

## 1 新能源对电网的影响分析

新能源的低碳、清洁特性成为驱动能源转型的关键力量,但其不确定性对电力系统平衡、调峰调频等带来新的挑战,因此不能脱离电网独立分析新能源特性,只有深入分析新能源在“源网荷”背景下的运行特性,才能保证源网荷协调发展,有助于优化新能源配置、新能源消纳和电网的安全稳定运行。

新能源对电网的影响从横向上看有电力平衡、电量平衡、调峰及调频影响,从纵向上看需评估上述影响因子在不同时间尺度上的评价效果。

在分析地区新能源消纳能力时,对地区电网影响最严重的时刻往往是负荷高峰与低谷时段的新能源出力,需应用这些典型场景的新能源出力系数进行电力平衡与调峰计算,即需要建立新能源与负荷相关的出力特性指标;评估地区新能源消纳水平时,弃风弃光率是衡量新能源利用率的重要指标,研究新能源出力与电量的关系对新能源规划尤为重要,即需要建立新能源电量特性指标;在地区调峰特性分析中,需要评估调峰最严峻时段和调峰需求,来相应提出调峰措施,保障电网安全运行,即需要建立反映反调峰特性的指标;在电力系统稳定性评估中,由于新能源的波形特性,系统需要有应对波动与不确定性的调节手段和资源,即需要建立量化灵活性需求的特性指标。

由于具有随机波动特征的新能源发展迅速,新型电力系统在不同时间尺度上的特性是变化的。在传统电源规划中,往往以年为规划时间分辨率,而在新型电力系统中则需要考虑多时间尺度多场景的电

力平衡分析;在电网实际运行中,需要以月、周为时间分辨率对一年、数年的机组检修、燃料储备、水量分配以及长期交易进行安排;以小时为分辨率对一周、一天的开机方式和出力水平进行优化<sup>[15]</sup>,因此研究不同时间尺度的新能源特性是适应新型电力系统发展要求的。

综上所述,从新能源及负荷的实际运行数据中挖掘出电网规划及运行所需要的、适应多场景应用的表征指标是非常必要的,新能源随机性、间歇性、波动性等不确定特征适用于用概率论研究<sup>[16-17]</sup>,宜采

用概率性指标。

## 2 评估新能源特性对电网影响的特性指标

### 2.1 指标评估体系

文章提出的评估新能源对电网影响指标分为 4 类,分别为出力特性、电量特性、调峰特性和灵活性需求特性;每类指标可以用极值、概率值等统计指标来计算,并根据场景需求按分钟、小时、月、年等不同的时间尺度来处理数据。文章提出的指标评估体系详见图 1。

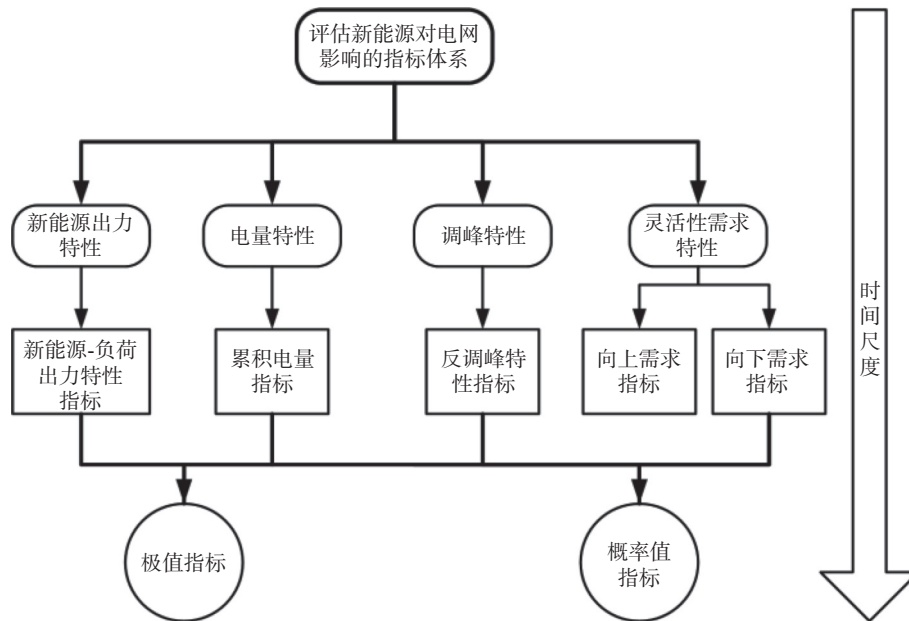


图 1 指标评估体系图

Fig. 1 Chart of index evaluation system

### 2.2 新能源出力特性指标

新能源在电网负荷特殊时段上的出力特性对电网具有典型意义,特别是峰谷时段对调峰和平衡均有较大影响,将源-荷作为整体分析,进一步认识其特性,有助于实现源荷互动,提高对新能源的高效利用。

用  $L_{DP}$ 、 $L_{NP}$ 、 $L_V$  表征在午高峰、晚高峰和低谷负荷下新能源出力指标,每类指标含  $C_{max}$ 、 $C_{min}$ 、 $C_{95max}$  和  $C_{95min}$ , 分别表示该时段的最大值、最小值和 95% 置信出力值。置信出力是指在一定概率下新能源的保证出力,通常置信度按 95%,  $C_{95max}$  指标表示新能源出力系数小于等于该值的概率为 95%, 即 95% 概率下的最大出力;  $C_{95min}$  指标表示新能源出力系数大

于等于该值的概率为 95%, 即 95% 概率下的保证出力。上述指标均采用新能源出力系数占比来表示,即用新能源出力与装机的比值来归一化处理作为衡量的统一尺度。

以午时段  $L_{DP}$  指标为例,极值指标公式为:

$$C_{max} = \max_{t \in T} \frac{N_t}{E_t} \quad (1)$$

$$C_{min} = \min_{t \in T} \frac{N_t}{E_t} \quad (2)$$

式中:

$N_t$  ——  $t$  时刻的新能源出力(MW);

$E_t$  ——  $t$  时刻的新能源装机(MW);

$T$  —— 计算选取的时间段即午高峰时段。

以午时段  $L_{DP}$  指标为例,概率指标公式为:

$$= C_t = \frac{N_t}{E_t}, C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (3)$$

$$L_{\max} = \text{Ceil}(n \times 95\%) \quad (4)$$

$$L_{\min} = \max\{\text{floor}[n \times (1 - 95\%)], 1\} \quad (5)$$

$$C_{95\max} = C_{L_{\max}} \quad (6)$$

$$C_{95\min} = C_{L_{\min}} \quad (7)$$

式中:

$C_t$  —— $t$ 时刻的新能源出力系数;

$C$  ——对午高峰时段的新能源出力系数数列按从小到大进行排序的数列;

$n$  ——统计时段的样本数;

$\text{Ceil}(\cdot)$  ——向上取整;

$\text{floor}(\cdot)$  ——向下取整;

$L$  ——相应保证率对应在此数列中的位置。

### 2.3 新能源电量特性指标

通过分析新能源不同出力区间对电量的贡献率来研究不同出力对电网的影响,用 $Q_{95}$ 指标表征累计电量达到95%对应的新能源出力系数,一般来讲新能源利用率达到95%为国际先进水平<sup>[18]</sup>,因此选取95%作为计算指标依据。该指标在实际应用中可用于表征95%消纳率下对应的新能源的有效容量,可用于新能源送出网架校核等,也可根据各地区实际情况和远景要求,设置合适的消纳率。

$Q_{95}$ 指标公式如下:

$$W_j = \sum_{i=1}^{N_j} W_i \quad (8)$$

$$W_{kj} = \frac{W_j}{Q} \quad (9)$$

$$Q_{kj} = \sum_{m=1}^j W_{km} \quad (10)$$

$$Q_{95} = j, \text{ if } Q_{kj} \geq 0.95 \& Q_{k,j-1} < 0.95 \quad (11)$$

式中:

$W_j$  ——第 $j$ 区间对应的总电量(kWh);

$N_j$  ——将新能源按出力系数划分为 $m$ 个区间, $N_j$ 为第 $j$ 区间对应的样本数;

$W_{kj}$  ——第 $j$ 个区间电量占总电量的比例;

$Q$  ——统计时段总电量(kWh);

$Q_{kj}$  ——第一个区间到第 $j$ 个区间的累计电量占比。

### 2.4 调峰特性指标

新能源的大规模接入使得电网的调峰面临巨大

挑战,特别是负荷低谷时段新能源反而大发即“反调峰特性”对电网的影响更甚,影响地区新能源的消纳、储能的配置等方面,反调峰特性反映为新能源接入后系统的峰谷差增大。净负荷为将新能源出力当作负的负荷与实际负荷叠加,用净负荷峰谷差能反映新能源出力的波动对地区电网调峰影响。若净负荷峰谷差较原始峰谷差变大,说明新能源对电网有反调峰作用。

用 $K_{\text{Neg}}$ 表示最大反调峰比,用 $P_{\text{Neg}}^+$ 、 $P_{\text{Neg}}^-$ 和 $P_{\text{Neg}}^0$ 分别表示正调峰概率、反调峰概率和平调峰概率,用净负荷的峰谷差变化来计算上述指标,具体为:

$$K_{\text{Neg}} = \min_{t \in T} \left( \frac{D_t - D'_t}{D_t} \right) \quad (12)$$

$$N_{\text{Neg}}^+ = \begin{cases} 1, & \text{if } D_t - D'_t > 0 \\ 0, & \text{if } D_t - D'_t \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{\text{Neg}}^+ = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N N_{\text{Neg}}^+ \quad (14)$$

$$N_{\text{Neg}}^- = \begin{cases} 1, & \text{if } D_t - D'_t < 0 \\ 0, & \text{if } D_t - D'_t \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$P_{\text{Neg}}^- = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N N_{\text{Neg}}^- \quad (16)$$

$$N_{\text{Neg}}^0 = \begin{cases} 1, & \text{if } D_t - D'_t = 0 \\ 0, & \text{if } D_t - D'_t \neq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$P_{\text{Neg}}^0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N N_{\text{Neg}}^0 \quad (18)$$

式中:

$D_t$  ——第 $t$ 天的原始峰谷差(MW);

$D'_t$  ——第 $t$ 天的净负荷峰谷差(MW);

$N_{\text{Neg}}^+$  ——正调峰,对系统调峰有正面;

$N_{\text{Neg}}^-$  ——负调峰,对系统调峰有反作用;

$N_{\text{Neg}}^0$  ——平调峰,对系统调峰没有作用;

$T$  ——计算选取的时间段;

$N$  —— $T$ 时间段的天数。

### 2.5 灵活性需求特性指标

随着大量新能源接入电网,新能源与负荷波动性叠加,需综合分析新系统下波动性的影响,系统需对负荷与电源的波动进行快速响应,评估系统的灵活性需求,保障电力系统安全可靠运行。系统波动性特征具有向上、向下的方向性和多时间尺度,且不同灵活性资源的响应能力与时间具有较强的相关性<sup>[19-20]</sup>。



用  $R_{\max}^+$ ,  $R_{\max}^-$  分别表征不同时间尺度下灵活性需求的最大向上调率和向下调率, 具体如下:

$$\begin{cases} R_{\text{flex}+} = \frac{P'_{t+1} - P'_t}{P_{\max}}, P'_{t+1} - P'_t > 0 \\ R_{\text{flex}-} = \frac{P'_t - P'_{t+1}}{P_{\max}}, P'_{t+1} - P'_t < 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} R_{\max}^+ = \max_{t \in T} R_{\text{flex}+} \\ R_{\max}^- = \min_{t \in T} R_{\text{flex}-} \end{cases} \quad (20)$$

式中:

- $P'_{t+1}$  ——第  $t+1$  时刻净负荷(MW);
- $P'_t$  ——第  $t$  时刻净负荷(MW);
- $P_{\max}$  —— $T$  时段最大负荷(MW);
- $R_{\text{flex}}^+$  ——灵活性需求向上调率;
- $R_{\text{flex}}^-$  ——灵活性需求向下调率。

### 3 算例分析

文章结合某地区新能源及电网数据给出文章所提的指标体系的两种算例分析, 一是以表形式给出文章指标的计算结果, 直观分析地区特性; 二是以图形式给出文章所提指标的分布特性, 来全面分析不同尺度下地区的新能源特性对电网的影响。

本小节以华东某地区 2021 年光伏、风电及负荷实际数据进行统计分析, 数据采样步长为 15 min。该地区从年负荷特性上看, 负荷高峰一般在夏冬两季, 春秋季节是负荷低谷时期; 从日负荷特性上看, 一般呈现午高峰和晚高峰两个高峰时段, 夜间 2:00—5:00 时为负荷低估时段。

#### 3.1 新能源-负荷相关出力特性分析

地区风电及光伏出力特性指标如表 1 和表 2 所示, 风电在 3 个典型时段最大值都比较大, 说明风电的随机性更强, 相对而言晚高峰和低谷风电极值和保证出力要大于午高峰。

光伏最大出力发生在午高峰, 其他两个时段光伏最大值和保证出力值明显小于午高峰。

表 1 风电出力特性指标

Tab. 1 Wind power output characteristics index

指标/p.u.	$L_{DP}$	$L_{NP}$	$L_V$
$C_{\max}$	0.768	0.850	0.840
$C_{\min}$	0.000	0.000	0.000
$C_{95\max}$	0.490	0.537	0.550
$C_{95\min}$	0.006	0.023	0.030

表 2 光伏出力特性指标

Tab. 2 Photovoltaic power output characteristics index

指标/p.u.	$L_{DP}$	$L_{NP}$	$L_V$
$C_{\max}$	0.720	0.209	0.341
$C_{\min}$	0.014	0.000	0.000
$C_{95\max}$	0.637	0.120	0.128
$C_{95\min}$	0.068	0.000	0.061

地区风电及光伏的  $C_{95\max}$  指标季特性分布如图 2 和图 3 所示, 风电在各季尺度上呈现较为一致的趋势, 均是秋季指标较小; 该地区光伏在春季午高峰较其他季节大, 晚高峰和低谷时冬季光伏较其他季节小。

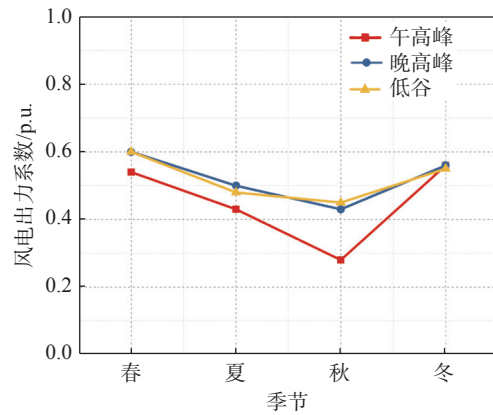


图 2 电网典型时刻的风电出力的季特性分布

Fig. 2 Seasonal distribution of wind power output under typical moment on the grid

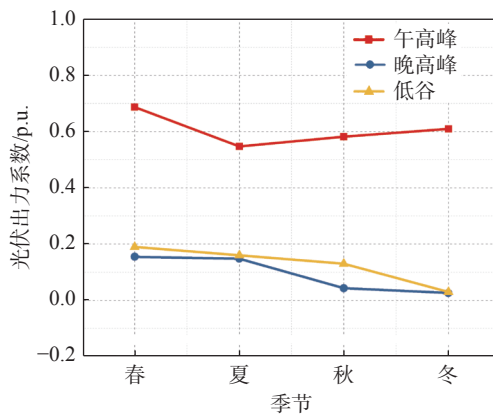


图 3 电网典型时刻的光伏出力的季特性分布

Fig. 3 Seasonal distribution of photovoltaic power output under typical moment on the grid

#### 3.2 新能源电量特性分析

地区新能源电量指标如表 3 所示, 风电和光伏出力系数在  $[0, 0.62]$  区间贡献了全年 95% 的电量;

地区新能源电量季特性分布如图 4 和图 5 所示, 从时段上看, 风电在 7:00—20:00 时累计电量相对较少, 在 21:00—6:00 时累计电量较多, 即白天风电电量少, 夜晚风电电量多。光伏与风电相反, 呈现午间 11:00—14:00 时大, 夜晚无的特性。从季节性上看, 四季呈现的特性较为统一, 均是春季较其他季节电量略多。

表 3 新能源电量指标

Tab. 3 New energy power quantity index

指标/p.u.	风电	光伏
$Q_{95}$	0.615	0.619

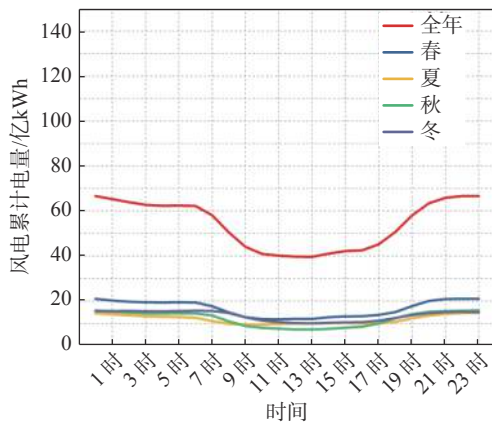


图 4 风电累计电量分布

Fig. 4 Cumulative power distribution of wind power

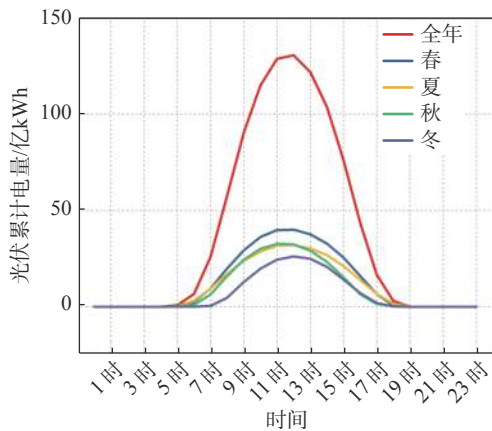


图 5 光伏累计电量分布

Fig. 5 Cumulative power distribution of photovoltaic power

### 3.3 新能源调峰特性分析

地区调峰特性指标如表 4 所示, 随着新能源的发展, 新能源对电网调峰的影响大概率是负面的, 即加重了系统的峰谷差, 春季的反调峰影响最大, 电网需要配置更多的调节手段, 相对来讲, 夏季与其他季

节相比, 调峰需要次数和调节资源相对较少。

表 4 新能源调峰特性指标

Tab. 4 New energy peak regulation index

调峰指标	全年	春	夏	秋	冬
$K_{Neg}$	-180	-180	-92.63	-130.82	-68.31
$P_{Neg}^+$	19	11	35	13	19
$P_{Neg}^-$	81	89	65	87	81
$P_{Neg}^0$	0	0	0	0	0

### 3.4 新能源波动性对系统灵活性需求影响分析

地区灵活性需求指标如表 5 所示, 随着时间尺度的增大, 系统的波动范围也随着增大, 从年数据上看, 向上和向下需求基本对称分布的; 就时刻特性如图 6 和图 7 所示, 1 h 尺度下, 晚间时段灵活性需求大都分布在  $-2\% \sim 0$ , 午间灵活性需求大都分布在  $0 \sim 2\%$ 。

表 5 新能源灵活性需求指标

Tab. 5 New energy flexibility demand index

灵活性需求指标	15 min	1 h	4 h
$R_{max}^+$	3.3	9.9	25
$R_{max}^-$	-3.4	-8.1	-25

## 4 结论

文章从新能源对电网影响的角度, 对评估指标

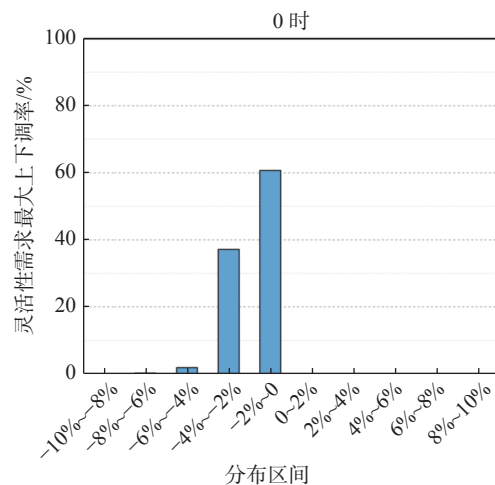


图 6 0 时的 1h 新能源灵活性需求分布

Fig. 6 Distribution of 1h new energy flexibility demand at 0 o'clock

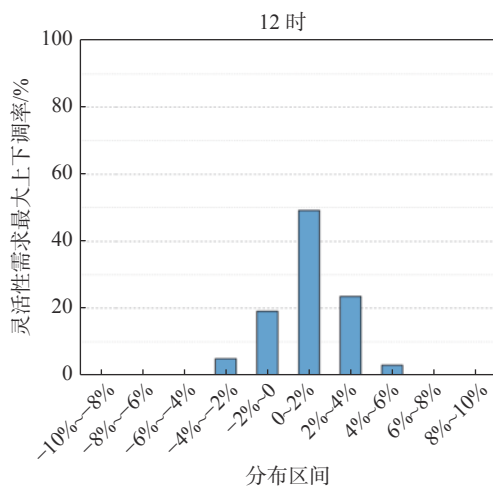


图 7 12 时的 1h 新能源灵活性需求分布

Fig. 7 Distribution of 1h new energy flexibility demand at 12 o'clock

进行分析,总结出适用于不同时间尺度评估体系和评估指标,用于反映新能源与电网的交互影响,并应用文章所提方法对某地区以实际运行数据为例计算了典型指标,分析不同尺度下地区的新能源特性对电网的影响,结果表明文章提出的各类指标能够快速量化电网与新能源的相关特征,从而充分挖掘出典型场景的源荷特征,为以新能源为主体的新型电力系统的规划、运行及建模提供参考和评价依据。

#### 参考文献:

- [1] 金晨,任大伟,肖晋宇,等.支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划研究[J].中国电力,2021,54(8):164-174. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202012126.  
JIN C, REN D W, XIAO J Y, et al. Optimization planning on power system supply-grid-storage flexibility resource for supporting the "Carbon Neutrality" target of China [J]. *Electric power*, 2021, 54(8): 164-174. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202012126.
- [2] 李剑楠,乔颖,鲁宗相,等.多时空尺度风电统计特性评价指标体系及其应用[J].中国电机工程学报,2013,33(13):53-61. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.13.022.  
LI J N, QIAO Y, LU Z X, et al. An evaluation index system for wind power statistical characteristics in multiple spatial and temporal scales and its application [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(13): 53-61. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.13.022.
- [3] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2016.02.008.

WANG J X, ZHANG Y, WAN X Z, et al. An operation-oriented evaluation index system for renewable power output characteristics: wind power output characteristics [J]. *Power system and clean energy*, 2016, 32(2): 42-51,57. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2016.02.008.

- [4] 王建学,张耀,万筱钟.光伏出力特性指标体系和分类典型曲线研究[J].电力需求侧管理,2017,19(5):8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2017.05.002.  
WANG J X, ZHANG Y, WAN X Z. Research of index system and typical curves on photovoltaic power output characteristics [J]. *Power demand side management*, 2017, 19(5): 8-12. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2017.05.002.
- [5] 黄伟,陈雪,林怀德,等.考虑光伏不确定性的配电网负荷特性概率评估[J].广东电力,2018,31(6):84-90. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2018.006.013.  
HUANG W, CHEN X, LIN H D, et al. Evaluation on load characteristic probability of power distribution network considering photovoltaic uncertainty [J]. *Guangdong electric power*, 2018, 31(6): 84-90. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2018.006.013.
- [6] 刘文霞,何向刚,吴方权,等.新能源发电出力特性指标及其数据化应用[J].电网与清洁能源,2020,36(9):85-92. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2020.09.013.  
LIU W X, HE X G, WU F Q, et al. New energy generation output characteristic index and its data application [J]. *Power system and clean energy*, 2020, 36(9): 85-92. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2020.09.013.
- [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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2018.07.005.  
GE Z H, ZHANG Q M, QI X G, et al. Index system for renewable energy output characteristics considering flexible demand [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(7): 30-37. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8930.2018.07.005.
- [8] 石亮缘,周任军,李娟,等.基于时间序列相似性度量的新能源-负荷特性指标[J].电力自动化设备,2019,39(5):75-81. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.011.  
SHI L Y, ZHOU R J, LI J, et al. New energy-load characteristic index based on time series similarity measurement [J]. *Electric power automation equipment*, 2019, 39(5): 75-81. DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.011.
- [9] 赵冬梅,尹颖涵,王建锋.间歇性能源出力特性综合分析体系及其应用[J].南方电网技术,2015,9(5):7-14. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.05.02.  
ZHAO D M, YIN H H, WANG J F. Comprehensive analysis system of intermittent energy output characteristics and its application [J]. *Southern power system technology*, 2015, 9(5): 7-14. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.05.02.
- [10] 吴振威,蒋小平,马会萌,等.多时间尺度的光伏出力波动特性研究[J].现代电力,2014,31(1):58-61. DOI: 10.3969/j.issn.

- 1007-2322.2014.01.011.
- WU Z W, JIANG X P, MA H M, et al. Study on fluctuations characteristics of photovoltaic power output in different time scales [J]. *Modern electric power*, 2014, 31(1): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2322.2014.01.011.
- [11] 冯士睿, 王莹, 牛涛. 南通电网典型地区风电与光伏出力统计特性分析 [J]. *电工电气*, 2018(8): 20-24. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2018.08.004.
- FENG S R, WANG Y, NIU T. Analysis on statistical characteristics of wind power and photovoltaic output in type area of Nantong power grid [J]. *Electrotechnics electric*, 2018(8): 20-24. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2018.08.004.
- [12] 田旭, 姬生才, 张娉, 等. 青海光伏与风力发电出力特性研究 [J]. *西北水电*, 2019(2): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2019.02.001.
- TIAN X, JI S C, ZHANG P, et al. Study on the output characteristics of photovoltaic and wind power generation in Qinghai [J]. *Northwest hydropower*, 2019(2): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2019.02.001.
- [13] 李雪峰. 蒙东地区新能源发电特性与电网调峰需求研究 [J]. *电力与能源*, 2020, 41(3): 279-285,293.
- LI X F. Characteristics of new energy power generation and power grid peak-shaving demand in eastern Mongolia [J]. *Power & energy*, 2020, 41(3): 279-285,293.
- [14] 路建明, 石辉, 贺鹏程. 湖南电网调峰特性分析及建议 [J]. *湖南电力*, 2019, 39(3): 54-56. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0198.2019.03.013.
- LU J M, SHI H, HE P C. Analysis and proposal on peak shaving characteristic of Hunan power grid [J]. *Hunan electric power*, 2019, 39(3): 54-56. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0198.2019.03.013.
- [15] 邵成成, 冯陈佳, 王雅楠, 等. 含大规模清洁能源电力系统的多时间尺度生产模拟 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(19): 6103-6113. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191281.
- SHAO C C, FENG C J, WANG Y N, et al. Multiple time-scale production simulation of power system with large-scale renewable energy [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(19): 6103-6113. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191281.
- [16] 万灿, 崔文康, 宋永华. 新能源电力系统概率预测: 基本概念与数学原理 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(19): 6493-6508. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210931.
- WAN C, CUI W K, SONG Y H. Probabilistic forecasting for power systems with renewable energy sources: basic concepts and mathematical principles [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(19): 6493-6508. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210931.
- [17] 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. DOI: 10.7500/AEPS20200811008.
- WAN C, SONG Y H. Theories, methodologies and applications of probabilistic forecasting for power systems with renewable energy sources [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(1): 2-16. DOI: 10.7500/AEPS20200811008.
- [18] 张振宇, 王文倬, 张小奇, 等. 基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法 [J]. *电网技术*, 2021, 45(2): 632-639. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1541.
- ZHANG Z Y, WANG W Z, ZHANG X Q, et al. Renewable energy capacity planning based on carrying capacity indicators of power system [J]. *Power system technology*, 2021, 45(2): 632-639. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1541.
- [19] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 9-20. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162503.
- LU Z X, LI H B, QIAO Y. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 9-20. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162503.
- [20] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(16): 3-16. DOI: 10.7500/AEPS20220224001.
- LU Z X, LIN Y S, QIAO Y, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(16): 3-16. DOI: 10.7500/AEPS20220224001.

---

作者简介:



章雪萌

章雪萌 (通信作者)

1985-, 女, 高级工程师, 注册电气工程师, 主要从事电网规划和新能源并网分析工作 (e-mail)zxm0804@163.com。

(编辑 叶筠英)