

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.010

# 间歇式新能源消纳评估常用方法分析

李建涛, 李永光, 朱泊旭, 马昕霞

(上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 200090)

**摘要:**随着我国能源需求和环保意识的提升,以风电、光伏等间歇式新能源为代表的绿色能源装机容量持续上升。大规模间歇式新能源消纳受电源、网架及负荷等多方面因素影响,为提升新能源的开发利用率,须采用合适的消纳评估方法对消纳情况进行分析。解析法反映了间歇式新能源消纳问题的本质,文中首先阐述解析法的数学模型,并结合解析法的运用对该方法进行评价。然后,梳理时序生产模拟法及随机生产模拟法的原理及运用情况,这2种方法是以解析法原理为基础,分别针对建模时对间歇式新能源消纳的时序特性、随机特性考虑不足而提出的改进方法,虽然这2种方法的运用仍存在各自的局限性,但相较于解析法,两者的求解精度均有了较大提升。最后,结合现有技术对未来间歇式新能源消纳评估方法研究进行展望,为评估方法建模、运用及改进等提供参考。

**关键词:**间歇式新能源;消纳评估;解析法;时序生产模拟法;随机生产模拟法;时序特性;随机特性

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2022)05-0085-09

## 0 引言

近年来,我国能源危机问题和环境治理压力日益严峻,风电和光伏等间歇式新能源发展持续加速。2021年,我国风电、光伏新增装机容量约1.01亿kW,占比超过全球风电、光伏新增装机容量的50%,成为全球可再生能源发展的中坚力量。我国将进一步推进新能源发展,风电和光伏等间歇式新能源装机容量将持续上升。预计到2030年,我国风电、光伏总装机容量将超过12亿kW<sup>[1]</sup>。

风电和光伏等间歇式新能源装机容量的大规模快速上升,将带来严重的消纳难题。间歇式新能源消纳主要受以下几方面因素的影响:一是电源侧,间歇式电源出力容易引起谐波、谐振等问题,而辅助消纳的常规电源调峰能力有限且随季节等因素波动<sup>[2-3]</sup>;二是网架侧,我国新能源主要分布于西部及三北地区,负荷主要位于中东部地区,跨区域建设联络线受经济成本、潮流分布等因素限制<sup>[4-6]</sup>;三是负荷侧,负荷的时序特性、需求响应特性以及电能替代水平等影响新能源的消纳<sup>[4]</sup>;四是储能侧,储能系统能促进新能源的消纳,而储能系统的运用受地势、环保、经济成本等因素影响<sup>[7]</sup>;五是政策方面,我国虽提出绿色证书认购制和可再生能源配额制等,但由于缺乏需求侧激励机制,其具体推进与实施仍有较大困难<sup>[5]</sup>。

为了综合考虑前述因素对间歇式新能源消纳的影响,促进间歇式新能源的高效利用,需要采用合适的方法对间歇式新能源的消纳情况进行评估。

文中对间歇式新能源常用的3种消纳评估方法原理进行分析<sup>[8]</sup>,着重综述了各评估方法在求解策略、评估指标、运用领域及改进方法等方面的情况,并通过对典型案例的分析,同时结合各评估方法的特点及运用情况对各个方法进行评价,最后对未来评估方法的研究方向进行了展望,为间歇式新能源消纳评估研究提供借鉴和参考。

## 1 解析法

### 1.1 解析法原理

解析法是利用解析式和定解条件获得特定可行解的方法,解析式一般为目标函数,可描述不同限制因素间的耦合关系,定解条件一般为影响间歇式新能源消纳的因素适当简化后转化而成的约束条件,其数学模型为:

$$\begin{cases} f(\mathbf{x}) = \mathbf{A}\mathbf{X} \\ \text{s.t. } k_{j,\min} \leq g(\mathbf{x}_j) \leq k_{j,\max} \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(\mathbf{x})$ 为目标函数,一般为最大收益或最小成本; $\mathbf{X}$ 为影响目标函数的决策矩阵, $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \dots \ \mathbf{x}_n]^T$ ;  $\mathbf{A}$ 为影响决策的系数矩阵, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \dots \ \mathbf{a}_n]$ ;  $g(\mathbf{x}_j)$ 为第 $j$ 个决策分量 $\mathbf{x}_j$ 所满足的关系式,作为目标函数的约束条件,该式可为线性或非线性关系式; $k_{j,\max}$ ,  $k_{j,\min}$ 分别为约束条件的上、下边界值<sup>[9]</sup>。

间歇式新能源消纳领域的目标函数主要有:新能源最大消纳电量<sup>[3]</sup>、最经济消纳方案<sup>[10]</sup>、最大准入容量方案<sup>[11]</sup>等。常见的约束条件如表1所示。

### 1.2 解析法运用

利用解析法求解优化问题的本质是求解线性

表 1 间歇式新能源消纳常见约束条件  
Table 1 Common constraints for intermittent renewable energy consumption

约束条件	意义	参考文献
功率平衡约束	各电源出力功率与负荷、联络线等功率平衡限制	[10,12]
火电机组调峰深度约束	火电机组出力可调整范围限制	[10,12—13]
火电机组爬坡能力约束	单位时间内火电机组爬坡能力限制	[10]
旋转备用容量约束	火电机组的正负旋转备用容量受负荷等限制	[10,12,14]
水电机组出力约束	水电机组出力受生态流量等限制	[10,12]
间歇式新能源机组侧约束	间歇式能源机组装机容量及出力品质限制	[10,11,15]
母线电压约束	间歇式新能源机组的母线电压偏差限制	[11]
网架侧约束	联络线功率及地区潮流分布限制	[4,11—12]
负荷侧约束	电能替代新增等效负荷及负荷时序特性限制	[4]
储能侧约束	储能设备充放电速率约束和储能电量限制	[4]

或非线性规划问题。在间歇式新能源消纳评估领域,一般目标函数的求解多涉及非线性规划问题。在求解无功优化、潮流优化等非线性问题时,牛顿法与罚函数法、内点法、简化梯度法、序列二次规划法等都具有一定的适用性<sup>[9]</sup>。另外对于非线性规划问题也可通过添加分段线性约束等方法转化为线性规划问题进行求解<sup>[10]</sup>。根据求解问题的目标函数,如电价的优化计算<sup>[16]</sup>,采用线性规划问题的求解方法如单纯形法、图解法等也能取得良好的效果。

利用解析法对新能源消纳问题进行分析时,多从某些方面指标的变化衡量新能源消纳情况。文献[13]基于电源结构,以标准停电小时数的数学期望值作为可靠性指标,计算负荷低谷常规机组调峰能力,评估电网消纳新能源的能力。文献[17]基于电力功率平衡,以负荷低谷时风电场的利用率和同时率折算成风电接纳容量,评估电网最大接纳风电能力。文献[18]用概率法描述新能源出力,在枚举出力分布的基础上枚举损失电量,再根据消纳电量占理论可发电量的比值,评估电网消纳新能源的能力。文献[19]提出源网荷同步消纳方法,通过计算高载能负荷是否参与情况下的新能源实际出力,间接评估电网消纳新能源的能力。

解析法结合特定的约束条件,可以对间歇式新能源的消纳边界进行分析,特定约束一般包括负荷

约束或场景约束。可选取接近平均日负荷的某天,或接近极端日负荷的某天,或固定某一天作为典型日<sup>[20]</sup>,或选取某些特定的运行场景作为典型场景进行计算分析。文献[21]利用风电和光伏规划装机比例,求解每小时等效出力,结合夏、冬季典型日和供暖小负荷日3个典型日的每小时系统调峰裕度,计算得到每小时可消纳风电和光伏装机容量,综合比较分析得到可消纳新能源容量。文献[22]提出典型的电力系统运行场景可由不同的风电场景和需求场景组合而成,可用概率方法对风电消纳情况进行分析。

解析法可以结合约束条件进行量化计算,在风险评估、责任分析等领域应用广泛。文献[23]分析风电并网、风电自身、市场和政策等风险因素,基于解析法建立基于风险理论的大规模风电消纳能力评估模型。文献[24]基于潮流解和矩阵运算,提出采用数值指标电压责任因子量化多分布式发电系统中每个发电机对电压水平提升的责任。文献[25]基于解析法求解分布式发电系统能量损失最小时对应的潮流分布,研究可再生能源技术带来的额外降损效益,同时权衡能量损失和发电能力之间的关系。

### 1.3 采用解析法的典型案例分析

文献[12]中,2017年2月5日凌晨负荷低谷时,Y省风电最大出力达到3 818 MW,比计划高1 100 MW,调度人员根据表1中功率平衡、火电机组调峰深度、水电机组出力、联络线功率、间歇式新能源机组出力等约束,计算分析发现在该区域火电调峰深度已达极限、水电出力也下调至极限状态时,该地区仍无法完全消纳多余风电,故向总调申请调减异地C水电厂出力300 MW,以异步联网的方式避免弃风。同理,在该日白天,由于风电比计划少发,调度人员通过计算分析后,增加该区域火电与水电出力的同时,申请增加异地D水电厂出力以满足该地区的负荷需求。

综上所述,解析法可以快速清晰地量化分析间歇式新能源的消纳问题,得到边界解,对电力系统调度决策的快速制定具有辅助作用。但该法建模较为粗糙,如在上述案例中未考虑电源与负荷时序上的动态变化、网架侧的潮流变化等,故所得结果精确度较差,主要适用于小规模间歇式新能源消纳系统的量化计算。

## 2 时序生产模拟法

### 2.1 时序生产模拟法原理

时序生产模拟法又可简称为时序法。时序法

主要模拟新能源参与下的电力生产及负荷情况,该法基于解析法原理,以电力系统安全稳定运行的各种边界条件为约束,以小时甚至更短的时间为分辨率,按时间序列模拟各相关机组及联络线等的运行状况,时序法原理如图1所示<sup>[26]</sup>。该方法采用的数据可以是经过处理的历史数据,也可以是通过软件或算法仿真所得数据,故模拟的间歇式新能源机组的出力可能不等于某一具体日期的实际出力,但是在较长时间尺度下,可以从概率意义上模拟间歇式新能源出力对电力系统的影响,故而使用该方法评估间歇式新能源的消纳情况具有一定的合理性与实用性<sup>[27]</sup>。

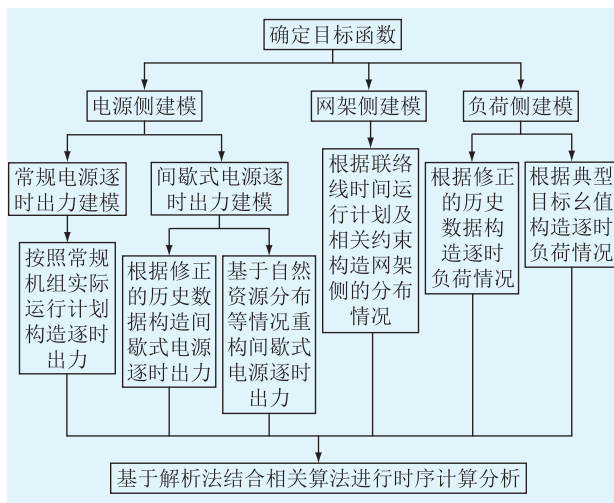


图1 时序生产模拟法原理

Fig.1 Principle of time series production simulation method

## 2.2 时序生产模拟法运用

时序法在求解时可以利用解析法所用的求解方法,也可结合算法进行求解。文献[28]以新能源逐时出力最大为目标函数,提出以粒子群优化算法为基础,并引入罚函数法处理模型中的不等式与等式约束条件,实现了问题的快速求解。文献[29]以降低新能源限电率和二氧化碳排放量为目标函数,在该模型进行求解时将其转化为混合整数规划问题,再利用分支界定法进行求解。时序法原理决定了其运算量较大,可结合 Matlab 及其他软件工具加速问题的求解。

时序法的运用涉及电源、网架及负荷等的建模,运用时较为繁琐,故有研究提出建立原始数据模型,研究人员可根据研究需求,对模型数据进行适当修改、添加或简化,从而达到研究目的。如文献[30]以小时为时间分辨率,对描述电源侧的各种电源出力及输电线路分布的各参数建模,对负荷以百分比形式建模等,为研究人员提供了 IEEE-RTS

79 电力系统时序数据模型。基于时序数据建模并结合现有技术,国内外学者开发了一系列基于时序法原理的软件辅助间歇式新能源消纳的评估<sup>[27, 31]</sup>。

利用时序法可以从较长时间尺度对影响新能源消纳的因素进行分析,文献[26]利用实际系统运行的历史数据建模。文献[27]利用 GOPT 软件改变约束条件建模,进行时序生产模拟计算后发现,制约可再生能源消纳的主要因素为系统调峰能力,此外,随着可再生能源渗透率的增大,调峰能力和线路传输能力贡献度减小,负荷需求量逐渐成为制约可再生能源消纳的主要因素之一。

时序法也可对间歇式新能源消纳的中长期规划效果进行评估,文献[32]基于时序法指出,允许合理的弃风弃光率、增加有效的风光装机容量,可使新能源总发电量增加,提升电网清洁水平。文献[4]基于时序法指出,在评估电网消纳能力的同时,须分析可再生能源发电量与功率削减量的走势,盲目追求可再生能源发电量可能导致可再生能源发电的经济性下降。文献[6]基于时序法,分别计算考虑约束条件的不同规划方案下新能源年有效利用小时数,并分别计算盈亏平衡点,使方案可以保证电力供应的可靠性和系统运行的经济性。

## 2.3 采用时序生产模拟法的典型案例分析

文献[28]运用时序法求解某省级电网全年的可再生能源消纳空间时,采集了该省级电网历史负荷、径流式水电机组运行及火电机组运行等数据,其中水电机组冬季出力只有夏季出力的 20%~30%,即冬季水电出力占比小,以火力发电为主参与系统调峰,常规机组的调峰能力为其装机容量的 50%,供热期的供热机组出力为其装机容量的 70%~85%,结合逐时的电力平衡、系统备用容量、火电机组出力、火电机组爬坡、水电机组出力、外送功率、弃可再生能源比例等约束,用粒子群算法求解全年逐时可再生能源消纳空间。与解析法采取极端典型日计算的结果相比,时序法求得的可再生能源消纳空间有所上升,所得结果更符合实际情况,也更适用于实际电力系统调度。

根据时序法的运用可知,时序法的精确度较解析法有了较大改善,该法的建模主要基于解析法的约束条件,长时间尺度上多因素计算虽可结合算法及其他工具的运用加速求解,但计算量相比解析法仍然较大,且由于该方法对场景或时序间的变换情况考虑不足,在实际运用中存在一定的局限性,另外,在缺乏完整时序数据的情形下,时序法的运用将受到一定限制。针对时序法的上述特点,该法主



要用于间歇式新能源消纳的中长期评估与规划。

### 3 随机生产模拟法

#### 3.1 随机生产模拟法原理

间歇式新能源消纳的随机生产模拟法用概率方式描述新能源出力、常规电源开机方式、负荷等的特征,并通过概率分布间的运算将不确定的随机变量转化为概率场景下的确定性运算,计算新能源消纳功率和限电功率的离散概率分布,实现新能源电力系统的随机生产模拟,进而快速计算消纳电量、限电电量等指标,评估系统新能源消纳能力<sup>[33]</sup>。随机生产模拟法对间歇式新能源消纳的计算主要有基于场景-概率间的转换、概率的计算等,该方法原理如图2所示<sup>[33-35]</sup>。

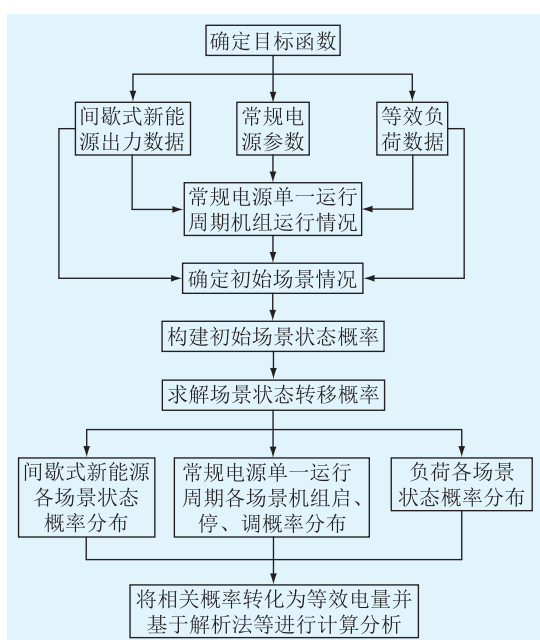


图2 随机生产模拟法原理

Fig.2 Principle of probabilistic production simulation method

#### 3.2 随机生产模拟法运用

随机生产模拟问题的求解主要针对概率与电量的转换,主要的求解方法有分段直线逼近法、分块法、半不变量法(又称累积量法)、傅里叶变换法、等效电量函数法等<sup>[9,36]</sup>。其中最常用的方法是等效电量函数法,该方法先将连续的时序负荷曲线转换为离散的持续负荷曲线,再采用离散的统计方法结合机组启停概率等做卷积运算得到等效电量函数,结合前述解析法即可实现问题的求解<sup>[8]</sup>。

随机生产模拟法可用于建立仿真模型,用概率方法评估新能源消纳,亦可协助提出消纳能力提升措施。文献[37]首先基于历史数据及卷积计算获得风光联合出力概率分布,并结合峰值负荷功率平

衡计算电力系统的调峰裕度概率分布,接着计算风电对负荷的贡献率,建立概率仿真模型对新能源消纳情况进行分析。文献[38]利用蒙特卡洛法反复模拟光伏渗透率最大时间点的光伏出力和负荷情况,记录系统电压水平,进行单渗透水平影响评估和整体消纳评估,针对在光伏最大消纳场景下系统出现的部分节点电压越限情况,提出光伏逆变器的电压阶段控制策略以缓解电压越限问题,提升系统光伏消纳能力。

在制定规划方案时,可用概率描述随机因素带来的影响,计算分析得出合理的方案。文献[39]以概率形式描述随机因素导致的场景,从而进行随机生产模拟,以求得多目标优化的可行方案,促进日前电价型和日内激励型需求响应政策在响应特性上的优势互补。文献[40]提出调峰容量不足概率和调峰电量不足期望值2个指标,基于随机生产模拟算法的运用,对接入不同类型和不同容量新能源后电力系统的可靠性和调峰性能变化情况进行研究。

在提出调整新能源消纳的方案后,也可利用随机生产模拟法评估方案效果。文献[8]运用随机生产模拟法评估不同调峰措施对风电消纳的影响,求解结果表明:即使在不同弃风率要求下,增加启停调峰机组数量促进消纳的效果仍要比增加可调节容量措施好。文献[41]提出风火联合外送概率模型,基于随机生产模拟算法模拟远端电网对受端电网的电力支援过程,实际算例表明风火联合外送不仅会降低系统总运行成本,提升送端地区各类型电源利用水平,而且可以缓解受端缺电现象。

针对传统随机生产模拟方法求解量较大的问题,文献[42]提出改进均匀抽样的类高斯分布抽样法对场景进行抽样,将解析法与随机生产模拟法相结合,求解电压灵敏度矩阵,仅需要进行一次潮流计算,避免了多次求解潮流的问题。文献[35]基于随机生产模拟提出多时间尺度的优化调度策略,在进行场景生成时计及误差状态的时间关联性,并用模糊C均值聚类对庞大的原始场景进行削减得到典型场景,减小了下一级时间尺度的计算压力。

传统随机生产模拟法主要基于概率计算,求解时无法考虑时变特性问题,因此文献[43]将等效电量函数法与频率持续法相结合用于风电场随机生产模拟,该方法保留了负荷和风电机组的时变特性,故可以评估常规随机生产模拟法考虑不到的时变因素。文献[44]将解析法与随机生产模拟法结合,设定风电出力预测误差符合混合偏态分布,光

伏出力符合均值为零、预测偏差为标准差的正态分布,负荷的随机性符合正态分布,为准确、灵敏地反映风光及负荷不确定性对电力系统技术经济指标的影响,结合风光出力预测的时变特性进行随机生产模拟计算。

### 3.3 采用随机生产模拟法的典型案例分析

在文献[33]中,研究人员利用随机生产模拟法对北方某省的新能源消纳能力进行计算时,首先基于该省风电、光伏装机容量,利用长时间序列建模方法获得风光联合出力在时间序列上的概率分布,再根据常规燃煤机组容量(最大调峰深度为装机容量的50%,供暖期供热机组调峰深度为装机容量的15%~25%)、负荷预测数据、联络线功率限制数据等,分别构建最大负荷-常规机组最小出力、最大负荷-负荷的联合概率分布;基于功率平衡等约束条件,在同一最大负荷下,对负荷和常规机组最小出力的概率分布进行计算,求解此条件下的消纳空间离散概率分布;结合风光联合出力概率分布,求解新能源限电率分布;结合等效电量函数等方法,求解新能源限电量。将该方法计算结果与时序法计算结果对比后发现,新能源限电率、新能源消纳电量和限电电量的相对误差均不超过 $\pm 3\%$ 。该方法计算速度是时序法的251.9倍,满足工程计算要求。

结合前文所述可知,采用随机生产模拟法对间歇式新能源的消纳情况进行评估时,用概率描述不确定因素对间歇式新能源消纳的影响,考虑了场景间或时序间的状态转移情况。与时序法相比,该方法在保证一定准确度的同时加快了求解速度,但由于其将解析法中多数约束条件转化为概率条件,求解结束后又须将其转换为等效电量,故该方法求解量仍比解析法大。另外,该方法对小概率大影响因素考虑不足,对评估结果有一定影响。根据上述特点,随机生产模拟法主要用于间歇式新能源消纳规划中不确定性场景问题的评估与分析。

## 4 评估方法对比与展望

间歇式新能源消纳评估常用方法主要有3种,分别为解析法、时序生产模拟法及随机生产模拟法。后2种是以解析法原理为基础并针对其存在的局限性提出的改进方法。3种方法在原理特点、计算量、应用场合及求解结果等方面的对比如表2所示。

虽然已经有大量文献对间歇式新能源的消纳评估方法进行研究,但由于间歇式新能源的消纳评估涉及源网荷等方面约束条件的建模,且求解过程

表2 间歇式新能源消纳评估方法对比  
Table 2 Comparison of intermittent renewable energy consumption assessment methods

方法	原理特点	计算量	主要应用场合	结果属性
解析法	基于合理的假设,建模相对粗糙	小	短期小规模间歇式新能源消纳问题的快速求解	确定性结果为主,含少量不确定性结果(概率结果),精确度较差,多为问题的边界解
时序生产模拟法	基于解析法,考虑了电力系统的时序特性,对完整时序数据依赖性强	大	间歇式新能源消纳方案的中长期规划	主要为确定性结果,较长尺度上精确度好
随机生产模拟法	基于解析法,用概率描述不确定性因素影响及消纳场景间转移情况,容易忽略小概率大影响事件	介于上述二者之间	间歇式新能源消纳方案的中长期规划,不确定因素对间歇式新能源消纳的影响评估	主要为不确定性结果,需要进行数据转换,精确度较好

较为复杂,在今后的研究中,仍有以下问题须重点关注。

(1) 解析法求解快速,而所得结果偏于保守,时序生产模拟法和随机生产模拟法考虑了间歇式新能源消纳的时序性和随机性,精确度有了较大的提升,但计算时间较长,如何均衡各方法的计算量和精确度,兼顾评估准确性与计算效率,是值得深入研究的问题。在关于随机生产模拟法的研究中,有研究结合频率持续法的运用,综合考虑间歇式新能源消纳的随机性与时序性,在将来对时序生产模拟法进行改进时,亦可考虑采用区间方法、仿射方法等,增强对不确定性影响因素的分析<sup>[9]</sup>。通过3种方法原理间的融合运用,协调评估方法的计算量与计算效率是值得探索的方向。

(2) 目前大量间歇式新能源消纳研究主要从常规电源调峰深度、网架侧潮流分布、间歇式新能源出力等方面展开,而影响新能源消纳的因素不是单一的,常规电源调峰深度的变化或者新能源出力的变化会对设备的启停、网架侧的潮流变化等带来影响,因此在将来的研究中应考虑多因素间的耦合关系,以提升新能源消纳评估的准确性与全面性。另外,为促进间歇式新能源的开发利用,目标函数不应仅是间歇式新能源的消纳电量,须同时考虑网架的潮流分布、系统的经济性及节能减排量等,因此多目标函数的优化计算值得进一步研究。

(3) 随着物联网、大数据分析技术的发展,与间歇式新能源相关的源网荷储侧数据的统计与分析变得更加快捷,与间歇式新能源消纳相关的数学建模可以变得更加精细<sup>[45-51]</sup>,此时基于前述技术开发

科学完善的关于电源出力及负荷等的分析预测模型将是一个值得探讨的问题。目前已经有较多研究基于间歇式新能源消纳评估方法原理,开发了相应的仿真模型或软件,一般适用于消纳方案的中长期规划与计算,未来应重点关注基于云端协调的虚拟电厂技术的发展,通过已有数学模型的运用,结合物联网及大数据分析技术进行云分析与云计算,实现日前计划和日内调整的统一,从源网荷储侧动态协调间歇式新能源的消纳,促进智慧能源技术的发展。

## 5 结语

随着我国对绿色能源发展支持力度的增强,风电、光伏等间歇式新能源在电网中的渗透率不断提高,对电力系统的安全稳定运行造成了威胁,导致我国弃风弃光问题日益严重。为促进间歇式新能源的开发利用,亟须开展间歇式新能源消纳评估工作。文中分析了影响间歇式新能源消纳的主要因素,并结合案例分析了3种常用间歇式新能源消纳评估方法的主要原理及运用情况,最后结合各方法的运用及现有技术的发展展望了其未来的研究方向,可为新能源消纳研究提供借鉴和参考。

### 参考文献:

- [1] 朱金凤. “十四五”下的可再生能源[J]. 电气时代, 2021(4):1.  
ZHU Jinfeng. Renewable energy under the 14 Five-Year Plan [J]. Electric Age, 2021(4):1.
- [2] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2):26-32, 39.  
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):26-32, 39.
- [3] 刘德伟, 黄越辉, 王伟胜, 等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22):77-81.  
LIU Dewei, HUANG Yuehui, WANG Weisheng, et al. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22):77-81.
- [4] 李恒, 孙伟卿, 向红伟, 等. 影响区域电网可再生能源消纳能力的边界条件分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8):108-114.  
LI Heng, SUN Weiqing, XIANG Hongwei, et al. Analysis on boundary conditions affecting consumption ability of renewable energy in regional power grid[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(8):108-114.
- [5] 张正陵. 中国“十三五”新能源并网消纳形势、对策研究及多情景运行模拟分析[J]. 中国电力, 2018, 51(1):2-9.  
ZHANG Zhengling. Research on situation and countermeasures of new energy integration in the 13th Five-Year Plan period and its multi-scenario simulation[J]. Electric Power, 2018, 51(1):2-9.
- [6] 彭波, 陈旭, 徐乾耀, 等. 面向新能源消纳的电网规划方法初探[J]. 电网技术, 2013, 37(12):3386-3391.  
PENG Bo, CHEN Xu, XU Qian Yao, et al. Preliminary research on power grid planning method aiming at accommodating new energy[J]. Power System Technology, 2013, 37(12):3386-3391.
- [7] KOOHI-FAYEGH S, ROSEN M A. A review of energy storage types, applications and recent developments[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27:101047.
- [8] 马彦宏, 姜继恒, 鲁宗相, 等. 基于随机生产模拟的火电机组深度调峰提升新能源消纳能力评估方法[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(1):35-43.  
MA Yanhong, JIANG Jiheng, LU Zongxiang, et al. Assessment method of conventional units with deep peak-shaving for renewable energy accommodation based on probabilistic production simulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1):35-43.
- [9] 董逸超, 王守相, 闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(7):2258-2266.  
DONG Yichao, WANG Shouxiang, YAN Bingke. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2258-2266.
- [10] 钟海旺, 夏清, 丁茂生, 等. 以直流联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3):36-42.  
ZHONG Haiwang, XIA Qing, DING Maosheng, et al. A new mode of HVDC tie-line operation optimization for maximizing renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3):36-42.
- [11] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8):2273-2280.  
ZOU Hongliang, HAN Xiangyu, LIAO Qingfen, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints[J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2273-2280.
- [12] 陈巨龙, 李震. 南方电网新能源消纳量化分析[J]. 云南电力技术, 2020, 48(2):17-20.  
CHEN Julong, LI Zhen. The quantitative analysis of new energy consumption in southern power grid[J]. Yunnan Electric Power, 2020, 48(2):17-20.
- [13] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4):70-76.  
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4):70-76.
- [14] 张振宇, 王文倬, 王智伟, 等. 跨区直流外送模式对新能源

- 消纳的影响分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11):174-180.
- ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, WANG Zhiwei, et al. Impact analysis and application of cross-region HVDC delivery mode in renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11):174-180.
- [15] 薛蕾, 井天军, 陈义, 等. 配电网光伏消纳能力定界模拟与消纳方案综合择优[J]. 电网技术, 2020, 44(3):907-916.
- XUE Lei, JING Tianjun, CHEN Yi, et al. Boundary simulation of PV accommodation capacity of distribution network and comprehensive selection of accommodation scheme[J]. Power System Technology, 2020, 44(3):907-916.
- [16] 王功涛, 于尔铿, 周京阳, 等. 发电竞价算法(五):线性规划法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8):20-23, 33.
- WANG Gongtao, YU Erkeng, ZHOU Jingyang, et al. Generation bidding algorithm tutorials part five: the linear programming method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8):20-23, 33.
- [17] 王芝茗, 苏安龙, 鲁顺. 基于电力平衡的辽宁电网接纳风电能力分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3):86-90.
- WANG Zhiming, SU Anlong, LU Shun. Analysis on capacity of wind power integrated into Liaoning power grid based on power balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3):86-90.
- [18] 何向刚, 蒋泽甫, 刘文霞, 等. 基于多状态概率模型的新能源消纳能力分析[J]. 电力大数据, 2018, 21(7):8-13.
- HE Xianggang, JIANG Zefu, LIU Wenxia, et al. Analysis of new energy accommodation capability based on multi-state probability model[J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(7):8-13.
- [19] 刘聪, 刘文颖, 王维洲, 等. 高载能负荷参与的电网消纳风光电力量度评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(1):223-229.
- LIU Cong, LIU Wenyong, WANG Weizhou, et al. A quantitative method to pre-evaluate power grid's capability of accommodation for wind/photovoltaic power under participation of high-energy load[J]. Power System Technology, 2015, 39(1):223-229.
- [20] 蔡国伟, 王大亮, 王燕涛, 等. 一种基于最短距离聚类与关联度分析的典型日选取新方法[J]. 中国电力, 2008, 41(4):15-18.
- CAI Guowei, WANG Daliang, WANG Yantao, et al. A new selection of the typical day based on the analysis of minimum distance cluster and interconnect degree theory[J]. Electric Power, 2008, 41(4):15-18.
- [21] 程临燕, 冯艳虹, 徐林. 基于风光互补出力特性的可消纳容量研究[J]. 中国电力, 2019, 52(7):63-68.
- CHENG Linyan, FENG Yanhong, XU Lin. Consumptive capacity research based on wind-solar hybrid characteristics[J]. Electric Power, 2019, 52(7):63-68.
- [22] XU Q Y, KANG C Q, ZHANG N, et al. A probabilistic method for determining grid-accommodable wind power capacity based on multiscenario system operation simulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):400-409.
- [23] HE Y X, XIA T, LIU Z Y, et al. Evaluation of the capability of accepting large-scale wind power in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19:509-516.
- [24] AYRES H M, FREITAS W, DE ALMEIDA M C, et al. Method for determining the maximum allowable penetration level of distributed generation without steady-state voltage violations[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(4):495.
- [25] OCHOA L F, HARRISON G P. Minimizing energy losses: optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1):198-205.
- [26] 谢国辉, 栾凤奎, 李娜娜, 等. 新能源消纳影响因素的贡献度评估模型[J]. 中国电力, 2018, 51(11):125-131.
- XIE Guohui, LUAN Fengkui, LI Nana, et al. Contribution evaluating model for the new energy accommodation influencing factors[J]. Electric Power, 2018, 51(11):125-131.
- [27] 李海, 张宁, 康重庆, 等. 可再生能源消纳影响因素的贡献度分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4):1009-1018.
- LI Hai, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Analytics of contribution degree for renewable energy accommodation factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4):1009-1018.
- [28] 彭旭, 李好文, 郑岗, 等. 基于时序生产模拟的可再生能源消纳评估方法研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11):26-30.
- PENG Xu, LI Haowen, ZHENG Gang, et al. Research on renewable energy accommodation assessment method based on time series production simulation[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(11):26-30.
- [29] 曹阳, 李鹏, 袁越, 等. 基于时序仿真的新能源消纳能力分析及其低碳效益评估[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17):60-66.
- CAO Yang, LI Peng, YUAN Yue, et al. Analysis on accommodating capability of renewable energy and assessment on low-carbon benefits based on time sequence simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17):60-66.
- [30] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, et al. The IEEE reliability test system-1996: a report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3):1010-1020.
- [31] 田鑫, 张健, 李雪亮, 等. 基于时序运行模拟的山东电网光伏发电消纳能力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8):34-43.
- TIAN Xin, ZHANG Jian, LI Xueliang, et al. Evaluating photovoltaic accommodation ability for the Shandong power system based on sequential operation simulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8):34-43.
- [32] 宋士瞻, 王传勇, 康文文, 等. 基于时序生产模拟的配电网光伏装机容量规划[J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48



- (5):131-136.  
SONG Shizhan, WANG Chuanyong, KANG Wenwen, et al. PV installed capacity planning for power distribution network based on time series production simulation[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2018, 48(5): 131-136.
- [33] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3134-3144.  
LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3134-3144.
- [34] 江雪辰, 朱俊澎, 袁越, 等. 基于新型场景划分与考虑时序相关性的光伏出力时间序列模拟方法[J]. 电力建设, 2018, 39(10): 63-70.  
JIANG Xuechen, ZHU Junpeng, YUAN Yue, et al. Simulation method based on improved scenario division considering temporal correlation for PV output time series[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(10): 63-70.
- [35] 董雷, 孟天骄, 陈乃仕, 等. 采用马尔可夫链—多场景技术的交直流主动配电网优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 147-153.  
DONG Lei, MENG Tianjiao, CHEN Naishi, et al. Optimized-scheduling of AC/DC hybrid active distribution network using Markov chains and multiple scenarios technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 147-153.
- [36] WANG X. Equivalent energy function approach to power system probabilistic modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 823-829.
- [37] WU J, QIU J, WANG X S, et al. Research on calculation method of renewable energy accommodation capacity based on probabilistic production simulation [C]//2018 8th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Colombo, Sri Lanka. IEEE: 151-156.
- [38] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 462-469.  
YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 462-469.
- [39] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3714-3723.  
LIU Xiaocong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Stochastic unit commitment model for high wind power integration considering demand side resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3714-3723.
- [40] 罗捷, 袁康龙, 钟杰峰, 等. 考虑新能源接入对系统调峰性能影响的随机生产模拟算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 180-187.  
LUO Jie, YUAN Kanglong, ZHONG Jiefeng, et al. Probabilistic production simulation algorithm considering new energy's impact on regulation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 180-187.
- [41] 姚力, 黄镔, 王秀丽, 等. 考虑风火联合外送的互联系统随机生产模拟[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1219-1225.  
YAO Li, HUANG Bin, WANG Xiuli, et al. Probabilistic production simulation of interconnected system by considering the joint delivery of wind power and thermal power generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1219-1225.
- [42] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1578-1587.  
XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1578-1587.
- [43] 张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 34-39.  
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, HU Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 34-39.
- [44] 丁明, 林玉娟. 考虑风光荷不确定性的随机生产模拟[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2937-2944.  
DING Ming, LIN Yujuan. Probabilistic production simulation considering randomness of renewable wind power, photovoltaic and load [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(10): 2937-2944.
- [45] LI R, HAN Y, MA T, et al. Nash-Q learning-based collaborative dispatch strategy for interconnected power systems [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 227-236.
- [46] 杨运国, 侯健生, 边晓燕, 等. 面向高比例新能源配电网的灵活性资源综合评价[J]. 供用电, 2021, 38(11): 68-76.  
YANG Yunguo, HOU Jiansheng, BIAN Xiaoyan, et al. Comprehensive evaluation of flexible resources for high penetration of renewable energy sources integrated to the distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(11): 68-76.
- [47] AN Q, WANG J X, LI G Y, et al. Role of optimal transmission switching in accommodating renewable energy in deep peak regulation-enabled power systems[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 577-584.
- [48] 王晓辉, 刘鹏, 季知祥, 等. 能源互联网共享运营平台关键技术及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 46-53.  
WANG Xiaohui, LIU Peng, JI Zhixiang, et al. Key technology and application of sharing operation platform for energy internet [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 46-53.
- [49] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China [J]. Power System Protec-



- tion and Control, 2020, 48(24): 1-8.
- [50] 闫湖, 黄碧斌, 胡静, 等. 决策型新能源统计分析关键技术及应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(11): 30-35.
- YAN Hu, HUANG Bibin, HU Jing, et al. Research on key technologies and applications of decision making based new energy statistics analysis[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(11): 30-35.
- [51] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 考虑风光新能源参与二次调频的多源最优协同控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 43-49.
- YANG Lei, LI Shengnan, HUANG Wei, et al. Optimal coordi-

nated control of multi-source for AGC with participation of wind and solar energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 43-49.

作者简介:



李建涛

李建涛(1996), 男, 硕士在读, 研究方向为新能源规划与利用(E-mail: wulijt@yeah.net);  
李永光(1957), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源开发与利用;  
朱泊旭(1994), 男, 硕士在读, 研究方向为新能源深度开发。

## Analysis of common methods for intermittent renewable energy consumption assessment

LI Jiantao, LI Yongguang, ZHU Boxu, MA Xinxia

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** With the improvement of China's energy demand and environmental protection awareness, the installed capacity of green energy represented by intermittent renewable energy such as wind power and photovoltaics is visible in the upward trend. Large-scale intermittent renewable energy consumption is affected by many factors such as power supply, grid and load. In order to improve the development and utilization rate of renewable energy, appropriate consumption assessment methods should be used to analyze the consumption situation. The analytical method reflects the essence of the intermittent renewable energy consumption problem. The mathematical model of the analytical method is clarified firstly, and the method is assessed in combination with the application of the analytical method. Then, the principle and application of the time series production simulation method and the probabilistic production simulation method are sorted out. These two methods are based on the principle of the analytical method, and they are respectively proposed for the insufficient consideration of the time series characteristics and probabilistic characteristics of intermittent renewable energy consumption during modeling. Although the application of these two methods still has their own limitations, compared with the analytical method, the solution accuracy of the two methods has been greatly improved. Finally, combined with the existing technology, the future research on the assessment method of intermittent renewable energy consumption is prospected, which provides a reference for the modeling, application and improvement of the assessment method.

**Keywords:** intermittent renewable energy; consumption assessment; analytical method; time series production simulation method; probabilistic production simulation method; time series characteristics; probabilistic characteristics

(编辑 吴楠)