

引用格式:刘迪,吴林林,巩宇,等.基于滚动采样马尔可夫链模型的光伏时序功率模拟研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(3):207-216.

Citation: LIU Di, WU Linlin, GONG Yu, et al. Study on time series power simulation of photovoltaic output based on rolling sampling Markov chain model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 207-216.

# 基于滚动采样马尔可夫链模型的 光伏时序功率模拟研究

刘迪<sup>1</sup>, 吴林林<sup>1</sup>, 巩宇<sup>1</sup>, 赵一名<sup>1</sup>, 黄贤森<sup>1</sup>, 蔡建明<sup>1</sup>, 夏明超<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 光伏出力的波动性和随机性会给电力系统调度运行的安全性和可靠性带来影响。为了实现对光伏出力长时间尺度的准确模拟, 本文提出一种基于马尔可夫链的光伏场站时序功率模拟模型。首先, 建立光伏出力模型, 并对出力的不确定性和规律性特征进行研究分析; 然后, 在一阶马尔可夫链模型的基础上考虑相邻日之间的联系, 根据季节与天气因素以 10 d 为一个采样区间对历史数据进行滚动采样, 建立多状态转移概率矩阵, 构建全年时序出力模拟模型; 最后, 以某光伏电站全年出力数据与历史气象监测数据为基础, 通过实例模拟了全年的出力情况, 并与传统方法进行了对比分析。算例结果验证了所提方法的有效性, 表明该方法较好地模拟了受季节与天气影响下的光伏出力情况, 与历史实际情况更为吻合。

**关键词:** 光伏发电; 马尔可夫链; 状态转移概率矩阵; 时序功率模拟

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.03.023 中图分类号: TM743 文章编号: 1673-9140(2024)03-0207-10

## Study on time series power simulation of photovoltaic output based on rolling sampling Markov chain model

LIU Di<sup>1</sup>, WU Linlin<sup>1</sup>, GONG Yu<sup>1</sup>, ZHAO Yiming<sup>1</sup>, HUANG Xianmiao<sup>1</sup>,  
CAI Jianming<sup>1</sup>, XIA Mingchao<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China;  
2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The volatility and randomness of photovoltaic (PV) output will affect the security and reliability of power system dispatching operation. In order to accurately simulate the PV output over a long time scale, this paper proposes a time-series power simulation model of PV output based on Markov chain. Firstly, a photovoltaic output model is established, and the uncertainty and regularity characteristics of output are analyzed. Then, considering the output relationship between adjacent days of the year on the basis of the first-order Markov chain model, the historical data is sampled in a rolling way with 10 days as a sampling interval based on the season and weather factors, and a multi-state transition probability matrix is established, and then the annual time series output model is constructed; Finally, based on the output data and the annual historical meteorological monitoring data of a PV plant, the simulation of the annual output is conducted and the results are compared with the traditional methods. The example results verify the effectiveness of the proposed method, which shows that the method can simulate the PV output under the influence of season and weather, and is consistent with the historical actual situation.

**Key words:** PV output; Markov chain; state transition probability matrix; sequential power simulation

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目(52018K20007K)

通信作者: 夏明超(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事交通能源融合、配电网优化控制等研究; E-mail: mchxia@bjtu.edu.cn

2021年,中国可再生能源新增装机容量1.34亿千瓦,占全国新增发电装机的76.1%;可再生能源发电量达到2.48万亿千瓦时,占全社会用电量的29.8%。预测截至2050年,中国全年风电、光伏发电量可达全年总发电量的63.6%<sup>[1]</sup>。大力发展可再生能源可有效缓解资源枯竭与环境污染问题,但可再生能源具有的波动性与随机性使得其大规模接入令电力系统的结构、运行特性变得复杂<sup>[2-8]</sup>,同时可再生能源装机规模与系统消纳能力有限之间的矛盾致使“弃风、弃光”现象大量存在<sup>[9-11]</sup>。因此,可再生能源出力情况的可靠模拟对提高资源利用率和满足可再生能源场站规划要求尤为重要<sup>[12-18]</sup>。

现阶段针对可再生能源出力预测方法主要有3种:典型日法、聚类算法和时序生产模拟法。典型日法是指以模拟场站可再生能源出力情况具有代表性的一天作为出力场景<sup>[19-20]</sup>,该方法较为简单,不适用于长期模拟。聚类算法则是通过对长时间时序的清洁能源实际出力场景进行信息提取、归类和化简,进而得到典型场景集合<sup>[21]</sup>。传统的聚类算法难以解决任意分布式复杂问题<sup>[22]</sup>。时序生产模拟法利用月度或年度数据序列,根据其他约束条件,逐时段模拟系统出力情况,相较于其余2种方法,采用时间序列数据,更能体现出可再生能源出力的时间特性,更适用于可再生能源出力的预测<sup>[23]</sup>。

当前已有许多针对可再生能源出力的时序生产的研究。文献[24]考虑不同的新能源渗透率下的场景,结合新能源出力边缘概率分布、随机过程的波动性和时空相关性,建立了风电和光伏发电的时序生产模型;文献[25]综合考虑风光出力特性、负荷特性等因素,构建了含新能源发电的电网年度时序生产模拟仿真模型;文献[26]结合最大负荷与最小负荷预测方法,提出了一种基于规模化风电网络的电网消纳风电出力的时序生产模拟计算方法。

现阶段的时序功率模拟法建立的模型和约束条件与实际情况存在一定差距,未能考虑新能源出力的季节、天气特性以及相邻日间出力的关联性,不能全面反映新能源出力的客观情况<sup>[27]</sup>。为此,本文在构建季节、天气状态概率转移矩阵的基础上,提出一种基于滚动采样马尔可夫链的光伏时序功率模拟模型。以江苏省某光伏场站为例,完成模型搭建与光伏出力的模拟,并综合比较传统采样模拟、本文所提滚动采样模拟生成序列与历史序列。

## 1 光伏出力模型

光伏发电利用的半导体光电效应原理将光能转变为电能。研究发现,光伏发电的出力<sup>[28]</sup>如下:

$$I_Q = N_a I_e - N_a I_h \left( e^{\frac{q(U + I_h R_b)}{mKT N_s}} - 1 \right) \quad (1)$$

式中, $I_Q$ 为负载电流; $I_e$ 为光生电流; $I_h$ 为P-N结反向饱和电流值; $K$ 为玻尔兹曼常数; $m$ 为电流理想因子; $T$ 为电池温度; $U$ 为所加电压值; $R_b$ 为串联电阻的等效阻值; $N_b$ 为串联电阻的个数; $N_a$ 为并联电阻的个数。光伏发电主要受电池温度以及光生电流等因素影响,而光生电流大小主要受光照辐射强度决定。一般来说,在一定范围内随着光照辐射强度的增大,激发出的半导体材料中的载流子数量就越多,从而产生的光生电流也就越大。光生电流与光照辐射强度之间的关系可以表示如下:

$$I_e = \eta \cdot P_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2)$$

式中, $\eta$ 为光电转换效率; $P_0$ 为入射光功率密度; $\alpha$ 为半导体材料的吸收系数; $d$ 为光程长度。

在一个光伏电站中,假设存在一定面积的多块光伏电池板,此时光伏发电量表达式<sup>[29]</sup>如下:

$$\begin{cases} P_{pv} = kSH_e \\ S = \sum_{j=1}^n S_j \end{cases} \quad (3)$$

式中, $S$ 为光伏板总面积; $H_e$ 为单位面积的太阳辐射强度; $k$ 为转化效率。

经过研究发现,光照强度的概率分布与风速类似,可以通过Beta分布函数进行表示,即光照强度的概率密度函数<sup>[30]</sup>如下:

$$f\left(\frac{H}{H_{\max}}\right) = \frac{\Gamma(\theta + \beta)}{\Gamma(\theta)\Gamma(\beta)} \left(\frac{H}{H_{\max}}\right)^{\beta-1} \left(1 - \frac{H}{H_{\max}}\right)^{\theta-1} \quad (4)$$

式中, $H$ 为光照实际强度值; $H_{\max}$ 为对应时间段内光照实际强度最大值; $\beta$ 、 $\theta$ 为函数形状参数。

光照强度概率密度曲线如图1所示。通过模型分析可以发现光照辐射强度 $H_e$ 可由光照实际强度 $H$ 与光照强度最大值 $H_{\max}$ 2个离散变量决定,而光伏发电输出功率 $P_{pv}$ 又可以由辐射强度 $H_e$ 线性表示。因此,本文认为光伏发电输出功率与光照强度符合同一类随机过程。光照实际强度 $H$ 受到多种因素影响,如地球公转造成的昼夜长短,正午太阳高度周年变化以及四季更替导致的太阳高度角与方位角的变化;大气层对太阳辐射的削弱影响和云层对其的遮挡程度和反射程度<sup>[31]</sup>都会对光照实际

强度造成影响,而在对应时间段内,光照实际强度最大值  $H_{\max}$  同样受到这些因素的综合影响。因此,随时间变化,光伏出力不仅具备随机性和波动性,也有一定的规律性。图 2 为 8 760 h 光伏出力时序图。

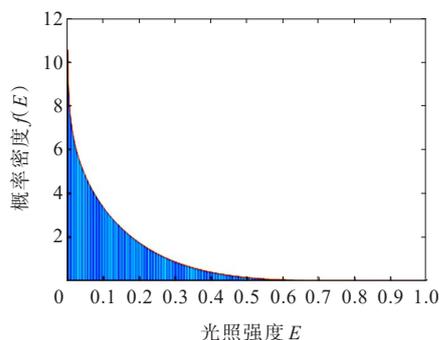


图 1 光照强度概率密度曲线

Figure 1 Probability density curve of light intensity

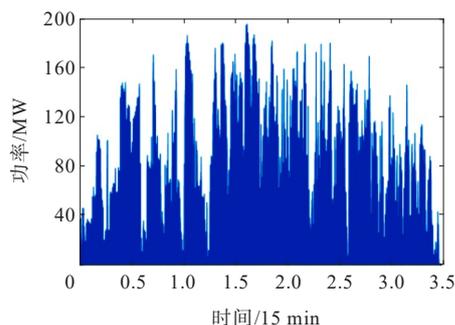


图 2 8 760 h 光伏出力曲线图

Figure 2 8 760 h PV output curve

天气影响光伏发电的随机性,天气对光伏出力的影响主要有不同天气云层对太阳辐射的吸收、反射以及散射作用。如晴天云层对太阳辐射的削弱作用较小,光伏出力数值较大且平稳,而多云、大雨这类天气则相反。因此,天气变化会影响光照辐射强度,从而影响光伏发电的随机性。其次,季节变化影响光伏发电的规律性,一般来说,夏季光照时间长、强度大,春秋次之,冬季居于末尾。

## 2 马尔可夫链模型

### 2.1 马尔可夫链光伏出力模拟模型

马尔可夫模拟是一种基于时间序列的分析方法,它指出一个系统由一种状态转移至另一种状态的过程中,存在着转移概率,且该转移概率可依据其前一种状态进行推算,而与系统原始状态无关<sup>[32-33]</sup>。由于天气变化与前一天天气状态有关,因此认为其适用于马尔可夫模拟。同时,由于光照强度可由马尔可夫随机过程表示,则光伏发电输出功率也服从马尔可夫过程<sup>[34]</sup>。因此,本文能够通过光伏

出力历史功率数据来模拟光伏系统运行出力情况。

### 2.2 状态转移概率矩阵

对马尔可夫链而言,状态转移概率是体现其性质的最直接、最重要的值,定义概率为

$$P_{jk}(m) = P\{X_{m+1} = k | X_m = j\} \quad (5)$$

式中,  $P_{jk}(m)$  为一个系统在  $m$  时刻状态表示为  $j$  而在下一时刻转移到  $k$  状态的概率,定义为一步转移概率,即状态转移概率。在一类随机过程中,有多个状态转移概率,通常将其变为矩阵形式。

假设随机事件有  $n$  个状态,随机事件状态的初始向量为

$$X_0 = [X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0k}, \dots] \quad (6)$$

式中,  $X_{0k}$  为随机事件是状态  $k$  的初始概率,在经过  $r$  步转移后随机事件是状态  $k$  的概率变为  $X_{rk}$ , 则  $r$  步转移后的随机事件状态向量为

$$X_r = [X_{r1}, X_{r2}, \dots, X_{rk}, \dots] \quad (7)$$

式中,  $X_{rk}$  为随机事件在  $r$  时刻是状态  $k$  的概率,则可得马尔可夫链模拟模型如下:

$$X_r = X_{r-1} \cdot P = X_0 \cdot P^r = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $P$  为状态转移概率矩阵;  $P^r$  为  $r$  步状态概率转移矩阵。

## 3 马尔可夫链光伏出力模拟模型

相较于其他时序法,光伏出力模拟采用马尔可夫链时序模拟法能够通过模拟光伏系统的实际运行场景来获得更准确的光伏出力数据,同时,其是一种基于统计学的方法,可以通过大量的模拟降低系统误差及随机误差,能够提高光伏出力模拟数据的可靠性<sup>[35]</sup>。

本文使用的滚动采样马尔可夫法在传统马尔可夫链模拟法仅有一个状态转移矩阵的基础上根据不同月份、天气类型将转移概率矩阵按照 10 d 为一个采样周期,1 d 为一个采样步进对光伏出力历史数据进行滚动采样并划分生成相互联系的多个出力状态转移矩阵及天气转移概率矩阵,针对原始马尔可夫法将所有状态放入一个矩阵造成状态转移区间过大的问题,本方法减小了采样区间的时间跨度,并消除了相邻月份初末 2 d 存在的割裂不连续的情况,进而提高了模型的精度。

### 3.1 考虑季节特性的天气概率转移矩阵

天气概率转移矩阵作为马尔可夫时序模拟方法的核心所在,需要将天气类型进行归类。考虑季节变化的因素,光伏出力表现为一年12个月内4个季节的出力特征各有不同,因此先设定全年的天气类型,在此基础上对每月出现频率较高的天气进行统计,基于滚动采样的马尔可夫链进行相应的统计分析并建立对应天气概率转移矩阵。例如,在1月建立6类天气的天气概率转移矩阵,矩阵形式如下: S、L、M、C、Y、H分别表示一个月出现的6种天气类型,其中 $P(L|S)$ 表示前一天为天气类型S的情况下,当日天气类型为L的概率。

$$P_{wt} = \begin{bmatrix} P_{(S|S)} & P_{(L|S)} & P_{(M|S)} & P_{(C|S)} & P_{(Y|S)} & P_{(H|S)} \\ P_{(S|L)} & P_{(L|L)} & P_{(M|L)} & P_{(C|L)} & P_{(Y|L)} & P_{(H|L)} \\ P_{(S|M)} & P_{(L|M)} & P_{(M|M)} & P_{(C|M)} & P_{(Y|M)} & P_{(H|M)} \\ P_{(S|C)} & P_{(L|C)} & P_{(M|C)} & P_{(C|C)} & P_{(Y|C)} & P_{(H|C)} \\ P_{(S|Y)} & P_{(L|Y)} & P_{(M|Y)} & P_{(C|Y)} & P_{(Y|Y)} & P_{(H|Y)} \\ P_{(S|H)} & P_{(L|H)} & P_{(M|H)} & P_{(C|H)} & P_{(Y|H)} & P_{(H|H)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3.2 考虑季节和天气特性的状态转移概率矩阵

通过光伏实际出力或本地天气因素历史数据划分出力的状态序列。在选取出力状态时,根据实际功率精度划分出力范围。当出力范围在 $P_{\min}$ 到 $P_{\max}$ 之间,选取 $P_r$ 为精度值,则离散状态数 $N$ 为 $(P_{\max} - P_{\min})/P_r$ ,得到出力序列为 $\{X_1, X_2, \dots, X_t, \dots\}$ ,其中 $X_1$ 对应出力为 $(P_{\min}, P_{\min} + P_r)$ , $X_2$ 对应出力状态为 $(P_{\min} + P_r, P_{\min} + 2P_r)$ ,依此类推。由于每个月的不同天气下出力特性有所差异,相较原始马尔可夫模型将所有状态放入同一状态转移矩阵,本文在基于不同月份 $\alpha$ 和天气类型 $\beta$ 分别建立多个状态转移矩阵 $P_{\alpha, \beta}$ 的基础上按照滚动采样的方式生成了365个状态转移矩阵。

### 3.3 模拟出力序列生成流程

本文以光伏场站出力情况和季节、天气特性为基础,构建基于滚动采样的马尔可夫链模型的光伏出力时序模拟方法,以10 d为一个采样周期,1 d为采样步进滚动对历史数据实现采样。其出力序列生成流程如图3所示,具体步骤如下。

1) 将全年数据按照月份 $\alpha$ 、天气类型 $\beta$ 进行分类,将每日的光伏出力以12:00为间隔分为上、下2部分,以10 d为一个采样周期得到光伏出力的功率状态转移概率矩阵 $P_s$ 。

2) 假定初始时刻为 $t_0$ ,选定当前的出力功率值,通过归一运算确定其出力状态 $X_0$ ,选定初始月份为 $\alpha_0$ ,初始日期为 $\eta_0$ 。

3) 根据初始 $\alpha_0$ 和 $\eta_0$ 确定采样起点,以10 d为一个采样周期共370组数据按照统计学概率生成相应的天气状态转移矩阵 $P_{\alpha_0, \beta}$ ,该矩阵体现出相邻2 d的天气变化规律,生成随机数 $\epsilon_0$ ,按照天气状态转移概率矩阵确定初始天气类型 $\beta_0$ 。

4) 由 $X_{t_0}$ 和功率状态转移矩阵 $P_s$ 得到下一时刻出力状态 $X_{t_1}$ ,生成随机数 $\epsilon_1$ ,对在精度要求值 $P_r$ 范围内找到状态转移概率矩阵中对应的出力变化,与此时刻出力状态叠加得到最终 $X_{t_1}$ 。

5) 循环执行步骤4)直至当日出力状态模拟结束,基于当日天气情况通过天气概率转移矩阵生成次日的预测天气,并生成次日首时刻的出力状态 $X_{m_0}$ ,同时由 $\beta_0$ 和天气状态转移概率矩阵 $P_{\alpha_0, \beta}$ 得到次日的天气情况 $\beta_1$ 。

6) 执行步骤2)到步骤5),同样按照滚动采样的方式向后依次滚动一天生成次日出力序列,直至全年365个出力序列全部生成。

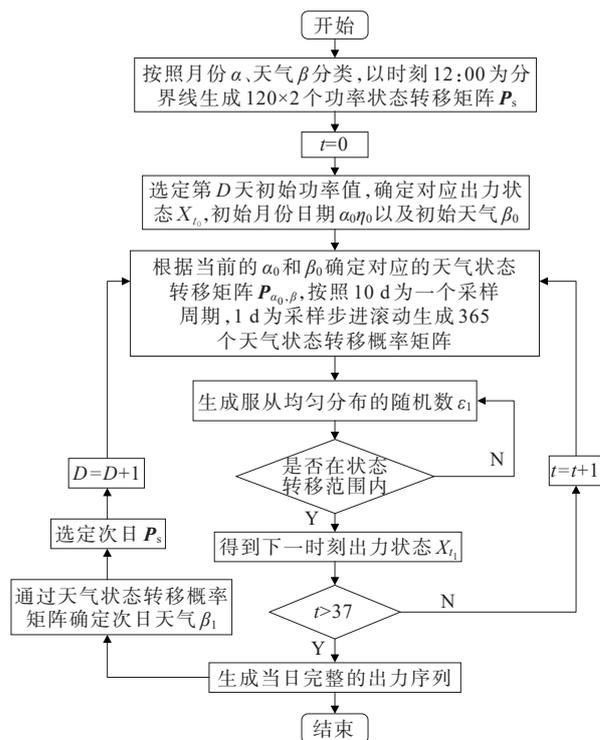


图3 出力序列生成流程图

Figure 3 Flow chart of output sequence generation

## 4 算例分析

### 4.1 模型建立

由于光伏出力过程中需要通过足够的历史数

据对天气与季节变化规律进行研究以得到合理的模拟结果,因此需要样本历史数据量足够大,才能较好模拟 1 d 中基于天气变化以及季节更替下的光伏出力情况。当数据样本数量不足则会出现天气、季节信息的缺失,由统计学得到的天气概率转移矩阵和状态转移概率矩阵精度降低,无法提取场站所在地区的气象条件与季节特性的变化规律,进而导致模型精度下降,因此本文所提模型的历史样本数据数量至少应不低于全年 8 760 h 的数据量。

本算例中对历史数据采用按月采样模型生成出力序列与滚动采样模型 2 种方法对光伏出力序列进行模拟,并对 2 种方法进行比较。利用江苏省某光伏电站全年每天 08:00—17:00 的光照辐射强度数据进行仿真验证,历史数据的时间间隔为 15 min,光伏电站额定功率为 3.5 MW,选取 5 kW 为光伏出力精度要求值。

#### 4.2 光伏出力时序模拟

天气状态的定义是一个抽象概念,它可以是温度、湿度、气压等属性,也可以是能见度、雾、雨、雪等天气现象,而在本文中天气状态则主要是指天气现象的类型。本文针对中国气象局所划分的 33 种主要天气类型,以 1 a 为时间基准从中选取出现概率较高的天气类型并将不同的天气类型依照云层厚度、光照强度及时长等归类依据将其归类到特定的天气现象中,在本文中主要划分为 10 类,分别为:晴、晴间多云、多云间晴、多云、阴、小雨、大雨、雷阵雨、小雪、大雪。10 种天气典型日出力曲线示意图如图 4 所示。

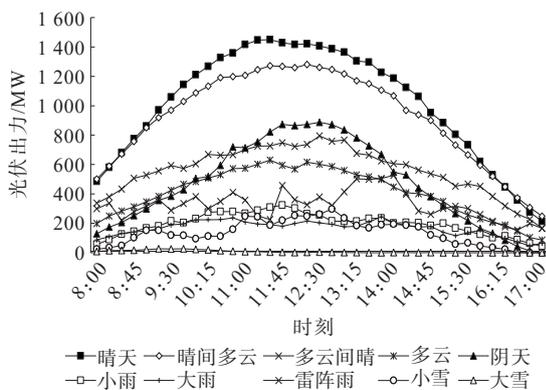


图 4 10 种天气光伏出力示意图

Figure 4 PV output diagram of ten weather types

按照滚动采样马尔可夫链模拟法生成全年的光伏出力功率序列,再按照 4 种不同季节分别从中选取 4 个典型月的光伏出力序列如图 5 所示。

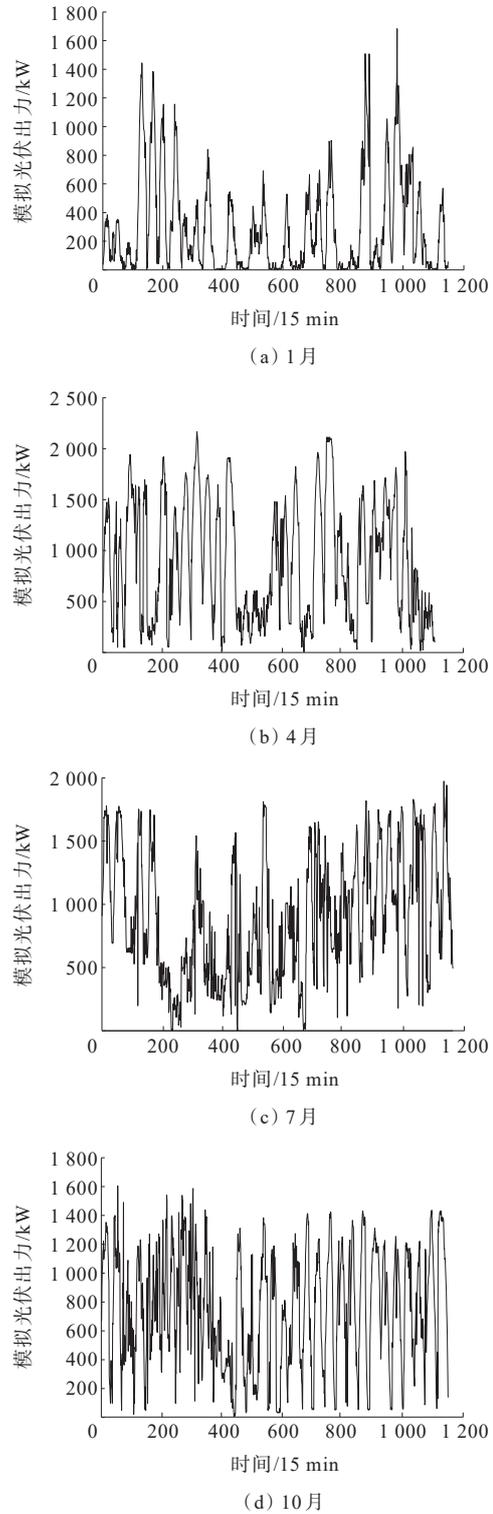


图 5 典型月时序模拟光伏出力序列

Figure 5 Typical month time series model PV output sequence

从图 5 可以看出,冬季 1 月的光伏出力波动大、峰值低、全月整体出力值较小,而春季 4 月与秋季 10 月全月整体光伏出力值较大但整体小于夏季 7 月的模拟出力序列。考虑光伏数据来源地江苏省位于南方,而南方夏季多云雨天气的情况可能会导致当

季光伏出力偏小,因此在模拟结果中出现夏季7月的光伏出力峰值小于春季4月是符合现实情况且较为合理的。选取相邻日天气情况相同或相似的2 d,得到其全天模拟光伏出力序列并将其与历史出力序列进行对比,所得结果如图6、7所示。

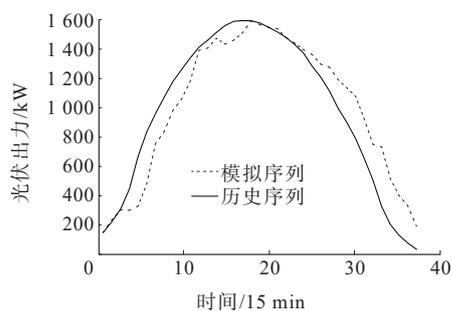


图6 1月晴天时序模拟光伏出力序列

Figure 6 January sunny time series model PV output sequence

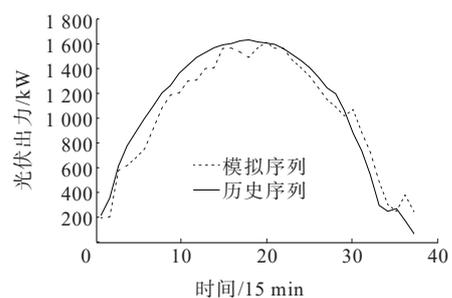


图7 3月降雨时序模拟光伏出力序列

Figure 7 March shower time series model PV output sequence

#### 4.3 2种马尔可夫模拟法光伏出力参数统计对比

在传统马尔可夫链模拟法和滚动采样马尔可夫模拟法生成的出力序列的基础上对全年模拟出力数据按月进行划分,并将其与历史光伏出力序列进行对比,所得的2种马尔可夫光伏出力时序模拟数据与历史出力数据的最大值与误差绝对值对比如表1所示。从表1可以发现,传统马尔可夫链模拟法与改进滚动马尔可夫模拟法所得到的光伏出力模拟序列的最大值均呈现出先增大后减小的趋势。其中,冬季典型月(1月)与秋季典型月(10月)的光伏月出力最大值远小于春季典型月(4月)和夏季典型月(7月),与文1中对光伏出力随季节变化呈现出春夏高、秋冬低的规律的分析一致。

图8所示为最大值绝对误差对比,可明显看出,本文所提滚动采样模拟法对应的光伏出力最大值误差普遍小于按月采样模拟法。又如表1所示,本文所提滚动采样模拟法的最大值绝对误差仅为

1.9%,远小于传统按月采样模拟法的4.7%,表明滚动采样模拟法在峰值模拟精度上要优于传统方法。

滚动采样模拟法所得月平均光伏出力值如图9所示。

表1 光伏出力统计参数比较

Table 1 Comparison of statistical parameters of PV output

月份	历史序列最大值/kW	按月序列最大值/kW	误差绝对值/%	滚动序列最大值/kW	误差绝对值/%
1月	1 685	1 598	5.2	1 699	0.8
2月	1 664	1 590	4.4	1 599	3.9
3月	1 962	1 827	6.9	1 896	3.3
4月	2 164	2 110	2.5	2 138	1.2
5月	2 167	1 993	8.0	2 093	3.4
6月	1 958	1 997	2.0	1 956	0.1
7月	1 947	1 781	8.5	1 846	5.1
8月	1 887	1 739	7.8	1 844	2.2
9月	1 873	1 826	2.5	1 849	1.2
10月	1 665	1 670	0.3	1 672	0.4
11月	1 606	1 499	6.7	1 595	0.7
12月	1 151	1 132	1.7	1 158	0.6
平均误差/%			4.7	1.9	

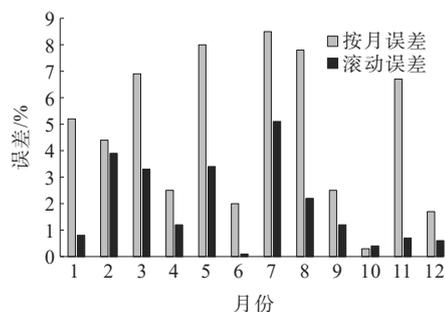


图8 最大值绝对误差图

Figure 8 Maximum value absolute error diagram

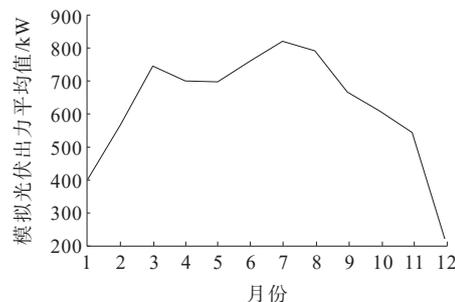


图9 改进模型月平均出力示意图

Figure 9 Improved model monthly average output

改进后的滚动采样马尔可夫时序模拟法能很好地体现光伏出力受天气、季节影响的变化趋势,

即四季变化所反映出的夏季光伏出力幅值大、时间长,冬季光伏出力幅值小、时间短的特点。

表 2 为算例设定的 10 种典型天气情况在 2 种不同采样法的基础上生成的光伏出力序列的均方根误差 (root mean square error, RMSE), 定义为

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \omega)^2} \quad (10)$$

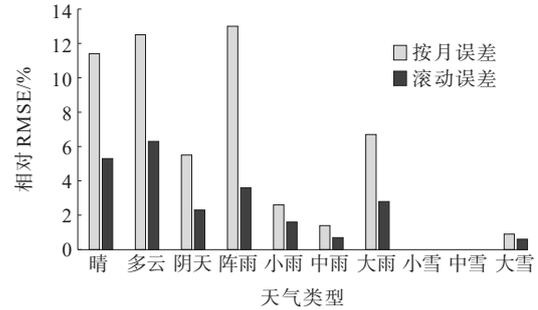
式中,  $y_i$  为历史序列;  $\omega$  为模拟序列。RMSE 值越小, 表明算例模拟值越接近实际情况。

**表 2** 光伏出力均方根误差比较  
**Table 2** Comparison of PV output RMSE

天气	按月序列		滚动序列	
	RMSE/kW	相对 RMSE/%	RMSE/kW	相对 RMSE/%
晴	400.4	11.4	186.3	5.3
多云	438.6	12.5	220.9	6.3
阴天	192.7	5.5	82.4	2.3
阵雨	457.3	13.0	128.1	3.6
小雨	92.8	2.6	57.1	1.6
中雨	49.1	1.4	24.5	0.7
大雨	233.9	6.7	98.7	2.8
大雪	32.8	0.9	20.2	0.6
平均相对 RMSE/%		6.8		2.9

通过表 2 发现, 如晴天、多云这类光伏出力波动较大的天气, 模拟出力值的 RMSE 都较大, 而大雨、大雪这类波动较小的天气, 其 RMSE 偏小。针对不

同类型天气, 改进的滚动采样马尔可夫模拟法的出力序列 RMSE 要小于传统模拟法, 并且滚动采样模拟法平均相对 RMSE 为 2.9%, 亦小于传统方法的 6.8%, 表明相较于传统方法, 滚动采样模拟法能更好地模拟光伏场站的出力情况。图 10 为 2 种模拟法的出力序列的相对 RMSE 柱状示意图。



**图 10** 相对 RMSE 图

**Figure 10** The relative RMSE diagram

**4.4 典型天气光伏出力对比**

表 3 为选定月份下的同种天气典型日光伏出力序列比较。同一种天气, 传统按月采样模型出力序列与历史出力序列在数值上相差较大。由于 1 d 内的天气不断变化, 而云层移动又难以预测, 因此在个别时刻会出现模拟值与历史值相差较大的情况。这种情况下滚动采样模拟序列在具体时刻数据上的模拟相较于按月采样也具有更高的精度。

**表 3** 典型日光伏出力比较

**Table 3** Comparison of typical solar photovoltaic output

时刻	晴天光伏出力/kW			多云光伏出力/kW			阴天光伏出力/kW			阵雨光伏出力/kW		
	历史	按月	滚动	历史	按月	滚动	历史	按月	滚动	历史	按月	滚动
08:00	149	139	150	222	74	287	172	196	114	216	96	196
09:00	667	294	429	758	222	745	380	496	297	887	319	678
10:00	1 179	667	982	1 020	370	967	249	524	242	1 263	617	1 188
11:00	1 461	1 160	1 407	774	350	773	346	555	392	1 529	1 208	1 400
12:00	1 594	1 363	1 512	808	1 098	1 049	395	684	461	1 624	1 496	1 535
13:00	1 517	1 325	1 540	1 247	1 153	1 328	362	515	411	1 595	1 515	1 563
14:00	1 283	984	1 364	1 069	646	956	104	376	131	1 409	1 334	1 338
15:00	899	781	1 135	877	228	692	296	428	350	1 062	191	1 019
16:00	325	624	733	90	301	95	102	178	129	296	108	487
17:00	34	12	192	264	380	350	50	227	139	68	223	245

**4.5 算例结果分析**

由于模拟生成的天气情况与历史实际存在一定差别, 从而导致模拟生成的光伏出力平均值与历史序列相比存在一定误差, 但整体变化趋势一致。

通过对比本文所提滚动采样模拟方法与传统按月采样模拟方法, 有如下结论: ①本文所提滚动采样模拟法在最大值误差方面小于按月采样模拟, 误差较小且控制在 5% 以内, 符合算例精度要求; ②改进

滚动采样模拟法所生成出力序列的RMSE远小于按月采样法,表明滚动采样模拟法结果更接近实际情况;③对比典型天气具体时刻光伏出力发现,滚动采样模拟法在具体时刻的模拟数据相较于按月采样模拟方法精度更高。上述结论表明改进后的滚动采样模拟法在考虑了季节与天气对光伏出力影响的基础上消除了相邻月之间存在的割裂情况,使得整个概率矩阵更加符合实际情况。

## 5 结语

本文提出了一种基于马尔可夫链模型的光伏出力时序模拟方法。在传统一阶马尔可夫链模型的基础上进行了改进:①该方法依据光伏能源场站历史气象监测数据建立数学模型,在考虑光伏出力随机性和间歇性的同时计及其受天气、季节影响出力所具有的规律性,将1 a分为12个月,以10种典型天气为例对状态转移矩阵进行修正,改进为多状态转移矩阵模型;②在按月划分的基础上,对原始数据实现滚动采样模拟,很好地消除了相邻月份由于割裂导致的模型精度下降的问题。算例结果表明,该改进时序生产模拟方法相较于以往按月划分研究的模拟方法,在光伏出力最大值等方面较为契合历史数据,误差较小,证明改进方法是有效可行的,与实际出力变化趋势一致,出力预测精度较传统模拟方法得到提高,结果更具可靠性。

### 参考文献:

- [1] 刘敦楠,李奇,秦丽娟,等.电网多时间尺度接纳可再生能源能力评估指标体系[J].电力建设,2017,38(7):44-50.  
LIU Dunnan, LI Qi, QIN Lijuan, et al. Evaluation of grid accepting renewable energy in multi-time scale[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(7): 44-50.
- [2] 丁明,林玉娟,潘浩.考虑负荷与新能源时序特性的随机生产模拟[J].中国电机工程学报,2016,36(23):6305-6314+6595.  
DING Ming, LIN Yujuan, PAN Hao. Probabilistic production simulation considering time sequence characteristics of load and new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6305-6314+6595.
- [3] 左立光,刘洲洲,彭旭.基于时序生产模拟的电网新能源跨区域消纳评估[J].能源与节能,2022(11):33-35+39.  
ZUO Liguang, LIU Zhouzhou, PENG Xu. Evaluation of cross-regional new energy consumption in power grid based on timing production simulation[J]. Energy and
- [4] 何飞帆,高文根,於跃.基于模糊控制的光伏微电网复合储能控制策略优化研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(3):56-63.  
HE Feifan, GAO Wengen, YU Yue. Research on the composite energy storage control strategy optimization of fuzzy control-based photovoltaic micro-grid[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(3): 56-63.
- [5] 李玉敦,谢开贵.含多个风电场的电力系统可靠性评估[J].电力科学与技术学报,2011,26(1):73-76+103.  
LI Yudun, XIE Kaigui. Reliability assessment of power systems containing multiple wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(1): 73-76+103.
- [6] 滕贤亮,谈超,昌力,等.高比例新能源电力系统有功功率与频率控制研究综述及展望[J].电力系统自动化,2023,47(15):12-35.  
TENG Xianliang, TAN Chao, CHANG Li, et al. Review and prospect of research on active power and frequency control in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 12-35.
- [7] 梁煜东,陈峦,张国洲,等.基于深度强化学习的多能互补发电系统负荷频率控制策略[J].电工技术学报,2022,37(7):1768-1779.  
LIANG Yudong, CHEN Luan, ZHANG Guozhou, et al. Load frequency control strategy of hybrid power generation system: a deep reinforcement learning-based approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1768-1779.
- [8] 韩志永,张宇华,李兵.基于多场景技术的冷热电虚拟电厂两阶段优化调度[J].电测与仪表,2022,59(3):174-180.  
HAN Zhiyong, ZHANG Yuhua, LI Bing. Two-stage optimal dispatching of CCHP virtual power plant based on multi-scenario technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 174-180.
- [9] PENG X, GAO G L, HU G G, et al. Research on inter-regional renewable energy accommodation assessment method based on time series production simulation[C]// 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Beijing, China. IEEE, 2019: 2031-2036.
- [10] 朱彦名,徐潇源,严正,等.面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J].电力系统保护与控制,2022,50(2):176-187.  
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power Internet of Things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.

- [11] 禹海峰,黄婧杰,蒋诗瑶,等.计及储能使用年寿命的风电场整体性储能配置[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):152-160.  
YU Haifeng, HUANG Jingjie, JIANG Shiyao, et al. The overall energy storage configuration of wind farms considering the service life of electric energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):152-160.
- [12] 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.
- [13] 陈启超,李晖,王帅,等.促进可再生能源消纳的多能互补时序运行模拟技术[J].电力建设,2019,40(7):18-25.  
CHEN Qichao, LI Hui, WANG Shuai, et al. Sequential operation simulation technology for renewable energy accommodation considering multi-energy complementarity [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(7):18-25.
- [14] 梅生伟,王莹莹,刘锋.风—光—储混合电力系统的博弈论规划模型与分析[J].电力系统自动化,2011,35(20):13-19.  
MEI Shengwei, WANG Yingying, LIU Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20):13-19.
- [15] 康俊杰,赵春阳,周国鹏,等.风光水火储多能互补示范项目发展现状及实施路径研究[J].发电技术,2023,44(3):407-416.  
KANG Junjie, ZHAO Chunyang, ZHOU Guopeng, et al. Research on development status and implementation path of wind-solar-water-thermal-energy storage multi-energy complementary demonstration project[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3):407-416.
- [16] 王吉利,薛飞,黄玉雄,等.数据驱动的区域电网新能源消纳受阻因素智能辨识方法[J].智慧电力,2022,50(10):95-101.  
WANG Jili, XUE Fei, HUANG Yuxiong, et al. Data-driven intelligent identification method of hindering factors for renewable energy consumption in regional power grids [J]. Smart Power, 2022, 50(10):95-101.
- [17] 魏韡,范越,谢睿,等.平抑高比例新能源发电功率波动的风—光—储容量最优配比[J].电力建设,2023,44(3):138-147.  
WEI Wei, FAN Yue, XIE Rui, et al. Optimal ratio of wind-solar-storage capacity for mitigating the power fluctuations in power system with high penetration of renewable energy power generation[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3):138-147.
- [18] 古宸嘉,王建学,李清涛,张耀.新能源集中并网下大规模集中式储能规划研究述评[J].中国电力,2022,55(1):2-12+83.  
GU Chenjia, WANG Jianxue, LI Qingtao, et al. Review on large-scale centralized energy storage planning under centralized grid integration of renewable energy[J]. Electric Power, 2022, 55(1):2-12+83.
- [19] 刘震,郑文聪.基于典型日法的微电网可靠性评估[J].通信电源技术,2018,35(3):11-13.  
LIU Zhen, ZHENG Wencong. Reliability evaluation of microgrid based on typical daily method[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(3):11-13.
- [20] 石蓉,王雪妍,陆鑫,等.基于改进聚类算法的清洁能源互联网源网荷储协调控制研究[J].电网与清洁能源,2023,39(7):134-139+146.  
SHI Rong, WANG Xueyan, LU Xin, et al. A study on the load and storage coordination control of clean energy Internet source network based on improved clustering algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7):134-139+146.
- [21] 姚剑峰,凌静,曲立楠,等.基于改进FCM聚类算法的清洁能源典型场景构建[J].电网与清洁能源,2019,35(4):76-82.  
YAO Jianfeng, LING Jing, QU Linan, et al. The construction method of typical scenario set for renewable energy based on improved FCM clustering algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(4):76-82.
- [22] 贾冉冉.改进的谱聚类算法研究及其在物流配送中的应用[D].青岛:山东科技大学,2018.  
JIA Ranran. Research on improved spectral clustering algorithm and its application in logistics distribution[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [23] 彭旭.基于时序生产模拟的新能源消纳评估方法研究[D].西安:西安理工大学,2019.  
PENG Xu. Research on evaluation method of new energy absorption based on time series production simulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [24] 席星璇.基于时序生产模拟的吉林省新能源并网系统成本研究[D].北京:华北电力大学,2021.  
XI Xingxuan. Research on the cost of new energy grid-connected system in Jilin Province based on time series production simulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [25] 张军,许晓艳,黄永宁,等.基于时序生产模拟仿真的宁

- 夏电网风光优化配比研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(19):81-86.
- ZHANG Jun, XU Xiaoyan, HUANG Yongning, et al. Optimal proportion study of wind and PV capacity in Ningxia power grid based on time sequence simulation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 81-86.
- [26] 吴冠男,张明理,徐建源,等.适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(23):151-157.
- WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 151-157.
- [27] 张秉良,张博颐,吴耀武,等.基于随机生产模拟的风电场容量及电量效益[J].中国电力,2013,46(8):74-79.
- ZHANG Bingliang, ZHANG Boyi, WU Yaowu, et al. An approach to evaluate the capacity benefits and energy benefits of wind farms based on probabilistic product simulation[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 74-79.
- [28] 张家安,王琨玥,陈建,等.基于空间相关性的分布式光伏出力预测[J].电力建设,2020,41(3):47-53.
- ZHANG Jia'an, WANG Kunyue, CHEN Jian, et al. Research on prediction of distributed photovoltaic output considering spatial relevance[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 47-53.
- [29] 张智勤.含新能源电力系统的随机生产模拟及评估[D].北京:华北电力大学,2017.
- ZHANG Zhiqin. Stochastic production simulation and evaluation of power system with new energy sources[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [30] 方保民,李红志,孔祥鹏,等.含高比例光伏出力的长期分布式储能配置研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):121-129.
- FANG Baomin, LI Hongzhi, KONG Xiangpeng, et al. Research on long-term distributed energy storage configuration with a high proportion of photovoltaic output[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 121-129.
- [31] 徐杉杉,朱俊澎,袁越,等.基于马尔可夫模型的光伏出力聚类与模拟[J].电力建设,2019,40(2):54-62.
- XU Shanshan, ZHU Junpeng, YUAN Yue, et al. Clustering and simulation of photovoltaic output adopting Markov model[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 54-62.
- [32] LI Y Z, NIU J C, LUAN R, et al. Research of multi-power structure optimization for grid-connected photovoltaic system based on Markov decision-making model[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China, 2008: 2607-2610.
- [33] LI Y Z, LUAN R, NIU J C. Forecast of power generation for grid-connected photovoltaic system based on grey model and Markov chain[C]// 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Singapore. IEEE, 2008: 1729-1733.
- [34] 丁明,徐宁舟.基于马尔可夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J].电网技术,2011,35(1):152-157.
- DING Ming, XU Ningzhou. A method to forecast short-term output power of photovoltaic generation system based on Markov chain[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 152-157.
- [35] ZHU C X, ZHANG Y, YAN Z, et al. A nested MCMC method incorporated with atmospheric process decomposition for photovoltaic power simulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2972-2984.