

DOI: 10.7652/xjtuxb201308011

分析光伏电站输出特性的云遮挡太阳辐射模型

李盼, 吴江, 管晓宏, 郑晗旭, 焦春亭, 王岱

(西安交通大学系统工程研究所, 西安, 710049)

摘要: 针对云层运动对于太阳辐射的影响, 提出一种结合晴天太阳辐射模型与云层运动方程组的云遮挡太阳辐射模型(SRMCI)。首先, 将云层运动的 Navier-Stokes 方程组及热力学方程进行差分后运用于耦合映射格, 并结合美国采暖、制冷与空调工程师学会制定的晴天太阳辐射模型, 引入水云对于太阳辐射的衰减因子, 最终建立 SRMCI 模型。将 SRMCI 模型的结果作为某 50 MW 光伏电站的波动性输入, 分析电站的输出功率的随机特性, 仿真结果表明: SRMCI 模型可模拟云层运动对于光伏电站的影响; 50 个含不同波动幅度大小的单元输出功率经过整合后, 光伏电站总输出功率波动得到了抑制; 云对电站总输出功率的衰减约为 17.7%, 电站总输出功率波动幅度约为单元输出功率平均波动幅度的 10.8%。

关键词: 太阳辐射; 光伏电站; 云遮挡; 耦合映射格; 随机特性

中图分类号: TP13; TM615 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)08-0061-07

Solar Radiation Model with Cloud Influence for Stochastic Characteristics Analysis of Large-Scale Photovoltaic Power Plant Output

LI Pan, WU Jiang, GUAN Xiaohong, ZHENG Hanxu, JIAO Chunting, WANG Dai

(System Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A solar radiation model with cloud influence (SRMCI) is proposed to consider the influence of cloud movement on solar radiation fluctuation for large-scale photovoltaic power plant. The model is based on the calculations of clear-sky solar radiation and cloud movement. The Navier-Stokes equations and the thermodynamic equations of cloud are differentiated for coupled map lattice to build the SRMCI by combining the clear-sky solar radiation model given by American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) and the attenuation model of solar radiation due to cloud droplets. Simulation results show that: 1) the proposed SRMCI model can efficiently analyze the stochastic characteristics of the solar power plant output; 2) the fluctuation of the total power output of the solar power plant is suppressed through aggregating power outputs of 50 units with different fluctuation; and 3) the attenuation of the total power output due to cloud is about 17.7%, and the fluctuation of the total power output is about 10.8% of the average fluctuation of the unit outputs.

Keywords: solar radiation; photovoltaic power plant; cloud influence; coupled map lattice; stochastic characteristics

光伏阵列的输出对天气变化非常敏感, 精确的 计算公式非常复杂, 同时光伏发电的特性同太阳的

收稿日期: 2013-03-20。 作者简介: 李盼(1990—), 女, 硕士生; 吴江(通信作者), 男, 博士, 讲师。 基金项目: 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金资助项目(61221063); 国家自然科学基金资助项目(61174146)。

网络出版时间: 2013-07-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130703.1047.003.html>

光辐射直接相关。太阳的光辐射具有能量密度低、稳定性差的弱点,使光伏发电系统的输出具有不连续性和不确定性^[1]。研究覆盖大面积的光伏电站输出功率的波动变化对于预防光伏电站并网后的潜在冲击有着重大意义。

当云层移动遮挡太阳时,常常会引起光电输出的重大变化。云层的变化往往可以由天气体现,如晴天时云量较少而多云时云量较多。除去云层遮挡因素外,太阳辐射也会随地理环境的变化而变化。高原空气比平原空气更干燥稀薄,云量较少;近海地区的总云量高于陆地,但云高却低于内陆^[2]。这些因素都可能导致太阳辐射的改变。城市化也有可能降低太阳辐射^[3]。除了地理气候因素,大气中的气溶胶、水气对于太阳辐射也有一定的反射与折射作用^[3]。在众多影响太阳辐射的因素中,云量对于太阳辐射的影响最大^[4]。

近年来,研究者先后提出了很多针对云的建模方法,包括分形几何模型、粒子系统模型、启发式模型、基于图像的建模模型及基于流体扩散的物理模型^[5-8]等。1999年,Stam在简化流体动力学方程后得到一种快速仿真算法^[6],但该模型仅限于烟雾的模拟,能否运用于云层的模拟还不确定。元胞自动机模型^[7]是一种更为快速的算法,这种算法只涉及布尔运算。但在元胞自动机的基础上,文献^[8]讨论了基于三维耦合映射格(CML)的云层模型,该方法适用范围较广,但对于 Navier-Stokes 方程组并未做进一步的研究。

本文针对太阳辐射的不连续性、不稳定性和受云层遮挡影响导致光伏电站出力不确定性问题,从高空云层运动的大气动力学特性出发,基于 Navier-Stokes 微分方程组并结合耦合映射格云模型,建立了有云遮挡的太阳辐射模型(solar radiation model with cloud influence, SRMCI),并进一步实现了大型光伏电站输出功率仿真。

1 云遮挡的太阳辐射模型组成

云遮挡是影响太阳辐射的主要因素。本文提出的 SRMCI 模型主要由以下 3 个部分组成:晴天太阳模型、耦合映射格云模型和云层对于太阳辐射的衰减模型。

首先,根据美国采暖、制冷与空调工程师协会(ASHRAE)的晴天太阳模型计算出无云晴天太阳辐射量。然后,将云层运动的动力学方程等应用于耦合映射格模型,利用耦合映射格云模型模拟云层

的运动。最后,由云层对太阳辐射的吸收率与反射率计算得到云层对于太阳辐射的衰减。整个建模过程如图 1 所示。

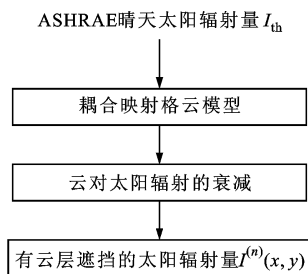


图 1 SRMCI 框图

1.1 ASHRAE 晴天太阳模型

ASHRAE 提出的晴天太阳模型如下^[9]

$$I_{TH} = (C + \sin\alpha) A e^{-B/\sin\alpha} \quad (1)$$

式中: I_{TH} 为水平总辐射量; A 为法向平面上测得的大气层外的辐射量; B 为大气的消光系数; C 为散射系数; α 为太阳高度角。

1.2 云的动力学方程

模拟大气运动,不考虑外力的作用,则 Navier-Stokes 方程有如下形式^[10]

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{V} = (u, v, w)$ 为流体速度; ρ 为流体密度; p 为压强; Re 为雷诺数。式(2)右边第 1 项为非线性项,代表速度的自平流项,第 2 项为压力项,第 3 项为黏滞力项,代表流体对于运动的阻力大小。

若进一步假设大气为不可压缩流体,并在笛卡尔坐标系展开,则有以下式^[10]

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \left(-u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dv}{dt} &= \left(-u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dw}{dt} &= \left(-u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

除此之外,大气的动力学方程还包括连续方程、状态方程、热力学方程及泊松方程^[11-12]。

1.3 耦合映射格云模型

耦合映射格云模型是基于元胞自动机的扩展模

型,仿真空间被划分为网格。每个网格有多个状态量,根据其周围网格的状态进行更新。耦合映射格云模型实际在于将空间及时间离散化,通过差分得到微分方程的数值解。

利用耦合映射格方法,云层仿真空间被分成 $N_x \times N_y \times N_z$ 个网格。根据上节讨论的大气动力学方程,在云的形成以及运动过程中需要考虑浮力、黏滞力与压力、水蒸气扩散、热力学扩散、相变与平流引起的物质转移^[6]。在 n 时刻每个网格中需要的状态变量为速度场 $\mathbf{V}^{(n)}(x, y, z)$ 、水蒸气质量 $w_v^{(n)}(x, y, z)$ 、水滴质量 $w_L^{(n)}(x, y, z)$ 以及温度 $T^{(n)}(x, y, z)$, 则经过差分后的状态变量形式为

$$\mathbf{V}^{(n)}(x, y, z) = \mathbf{V}(x\Delta l, y\Delta l, z\Delta l, n\Delta t) = (u^{(n)}(x, y, z), v^{(n)}(x, y, z), w^{(n)}(x, y, z)) \quad (4)$$

$$w_v^{(n)}(x, y, z) = w_v(x\Delta l, y\Delta l, z\Delta l, n\Delta t) \quad (5)$$

$$w_L^{(n)}(x, y, z) = w_L(x\Delta l, y\Delta l, z\Delta l, n\Delta t) \quad (6)$$

$$T^{(n)}(x, y, z) = T(x\Delta l, y\Delta l, z\Delta l, n\Delta t) \quad (7)$$

式中: x, y, z 为整数, $0 \leq x \leq N_x, 0 \leq y \leq N_y, 0 \leq z \leq N_z$; Δl 为空间差分长度,即耦合映射格网格边长; Δt 为时间差分长度。

1.4 云对太阳辐射的衰减模型

文献[13]利用反常衍射原理得到了云层内水滴的不同有效半径对太阳辐射的反射率与吸收率的影响。对于仿真中的云层,假定其中的水滴有效半径为 $5 \mu\text{m}$,则云层对于太阳辐射的吸收率与反射率由下式计算

$$\alpha^{(n)}(x, y) = 0.0725 \lg Q_{LWP}^{(n)}(x, y) - 0.0150 \quad (8)$$

$$\beta^{(n)}(x, y) = 0.2900 \lg Q_{LWP}^{(n)}(x, y) - 0.0067 \quad (9)$$

式中: $Q_{LWP}^{(n)}(x, y) = \sum_{z=1}^{N_z} w_L^{(n)}(x, y, z)$ 为云层液态水路径的质量变量。

2 SRMCI 控制方程

令初始输入向量为耦合映射格云模型在 0 时刻的状态向量值,即

$$\mathbf{x}_0 = [u^{(0)}(x, y, z), v^{(0)}(x, y, z), w^{(0)}(x, y, z), w_v^{(0)}(x, y, z), w_L^{(0)}(x, y, z), T^{(0)}(x, y, z)] \quad (10)$$

令状态向量为耦合映射格云模型在各个时刻网格状态变量值,即

$$\mathbf{x}^{(n)} = [u^{(n)}(x, y, z), v^{(n)}(x, y, z), w^{(n)}(x, y, z), w_v^{(n)}(x, y, z), w_L^{(n)}(x, y, z), T^{(n)}(x, y, z)] \quad (11)$$

令输出向量为每个时刻的辐射量,即

$$\mathbf{y}^{(n)} = I^{(n)}(x, y) \quad (12)$$

SRMCI 的控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}^{(n+1)} &= \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{x}_0, \boldsymbol{\zeta}^{(n)}) \\ \mathbf{y}^{(n+1)} &= \mathbf{G}(\mathbf{x}^{(n+1)}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(n)}, \mathbf{x}_0, \boldsymbol{\zeta}^{(n)})$ 为系统的状态方程; $\boldsymbol{\zeta}^{(n)}$ 为云模型状态向量中速度变量的边界条件; $\mathbf{y}^{(n+1)} = \mathbf{G}(\mathbf{x}^{(n+1)})$ 为系统的量测方程。

2.1 状态方程

本文在文献[8]的基础上,将云层受黏滞力与压力影响的动力学方程的差分形式进行了改进,本文改进后的系统状态方程如图 2 所示。

对于太阳辐射模型,状态向量由耦合映射格云模型的网格状态变量组成:速度向量 $(u^{(n)}(x, y, z), v^{(n)}(x, y, z), w^{(n)}(x, y, z))$; 水蒸气质量 $w_v^{(n)}(x, y, z)$; 水滴质量 $w_L^{(n)}(x, y, z)$; 温度 $T^{(n)}(x, y, z)$ 。

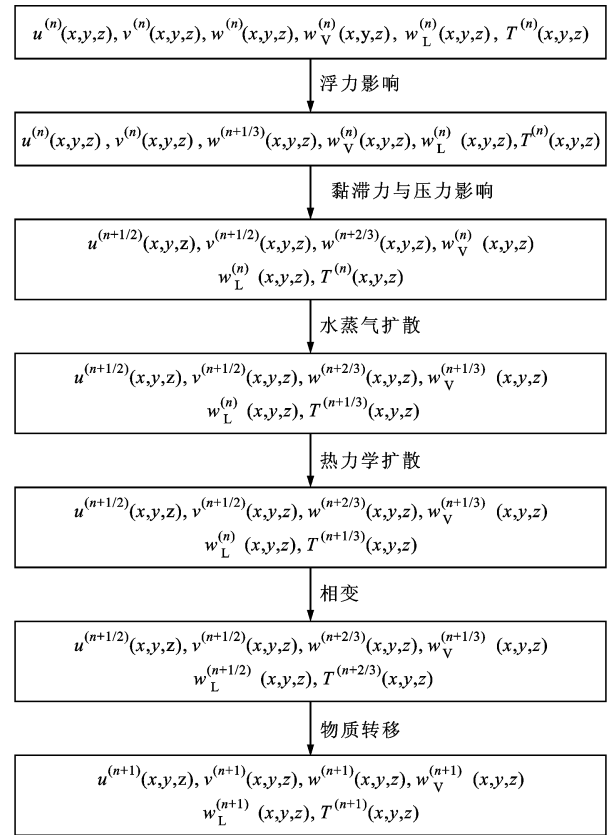


图 2 云层模型状态变量改变过程

本文 SRMCI 模型中的黏滞力与压力对速度的影响可用下式计算

$$\begin{aligned} u^{(n+1/2)}(x, y, z) = & u^{(n)}(x, y, z) + k_v \Delta_n u^{(n)}(x, y, z) + \\ & k_p \text{grad}(\text{div} \mathbf{V}(x, y, z))_x^{(n)} + k_d \Delta u^{(n)}(x, y, z) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: k_v, k_p, k_d 为非变量参数^[8];

$$\begin{aligned} \Delta_n u^{(n)}(x, y, z) = & ((u^{(n)})^2)_x - (u^{(n)} v^{(n)})_y - (u^{(n)} w^{(n)})_z \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$((u^{(n)})^2)_x = \frac{1}{4}((u^{(n)}(x+1,y,z) + u^{(n)}(x,y,z))^2 - (u^{(n)}(x,y,z) + u^{(n)}(x-1,y,z))^2) \tag{16}$$

$(u^{(n)}v^{(n)})_y, (u^{(n)}w^{(n)})_z$ 的计算同式(16);

$$\begin{aligned} \text{grad}(\text{div}\mathbf{V})_x^{(n)} = & \frac{1}{2}[u^{(n)}(x+1,y,z) + u^{(n)}(x-1,y,z) - 2u^{(n)}(x,y,z)] + \\ & \frac{1}{4}[v^{(n)}(x+1,y+1,z) + v^{(n)}(x-1,y-1,z) - v^{(n)}(x-1,y,z-1) - v^{(n)}(x+1,y-1,z) + \\ & w^{(n)}(x+1,y,z+1) + w^{(n)}(x-1,y,z-1) - w^{(n)}(x-1,y,z+1) - w^{(n)}(x+1,y,z-1)] \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} \Delta x^{(n)}(x,y,z) = & \frac{1}{6}(x^{(n)}(x+1,y,z) + x^{(n)}(x-1,y,z) + x^{(n)}(x,y+1,z) + \\ & x^{(n)}(x,y-1,z) + x^{(n)}(x,y,z+1) + x^{(n)}(x,y,z-1) - 6x^{(n)}(x,y,z)) \end{aligned} \tag{18}$$

2.2 量测方程

ASHRAE 的晴天太阳辐射量 I_{TH} 通过云层的反射与折射衰减后,得到有云层遮挡的太阳辐射量 $I^{(n)}(x,y)$ 的量测方程

$$I^{(n)}(x,y) = (1 - \alpha^{(n)}(x,y))(1 - \beta^{(n)}(x,y))I_{\text{TH}} \tag{19}$$

3 仿真验证

3.1 晴天太阳辐射模型仿真算例

根据 ASHRAE 模型得到的晴天太阳辐射量 and 美国 solarTAC 实验室的实测数据^[14],绘制了一天中 06:00 至 18:00 间隔为 6 min 的 120 个点的对比结果,如图 3 所示。可见,ASHRAE 模型能够较好地模拟晴天环境下的太阳辐射,但是不能体现云层对于太阳辐射的波动影响,如第 20 至第 32 点所对

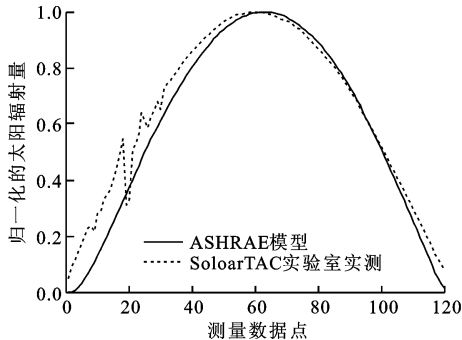


图 3 模型辐射量与实测辐射量的比较

应的 08:00 至 10:00 的波动。

3.2 SRMCI 仿真

在 ASHRAE 晴天太阳辐射模型中引入耦合映射格云模型,便可模拟有云天气下的太阳辐射。在云模型的状态变量设定中,温度为高度的函数,即高度每上升 100 m 温度降低 0.6 K,其余状态变量的初始化输入均为[0,1]区间上的随机数。此外,耦合映射格状态变量变化过程中的参数设定可参见文献[6]。耦合映射格上的变量值反映了云层的遮挡情况。本文模型选取耦合映射格空间大小为 $60 \times 60 \times 10$,各个网格边长为 20 m。云层运动模拟结果如图 4 所示。



图 4 云层运动示意图

取一天中 10:00 至 12:00 的 ASHRAE 晴天太阳辐射模型辐射量进行模拟。此时间段内共绘制 200 个点,每个时间间隔为 36 s。云层的速度边界条件为正态随机性输入。云层在仿真空间内的运动时间为第 1 至第 150 个点。

3.2.1 辐射量曲线分析 考虑到云层影响,本文选取了 4 个不同区域的代表性格 $p(45,50)$ 、 $p(45,50)$ 、 $p(45,50)$ 和 $p(50,15)$ 进行仿真分析,不同网格的太阳辐射量如图 5 所示。可以看出,各个网格的太阳辐射量受云层的影响不尽相同。例如,网格

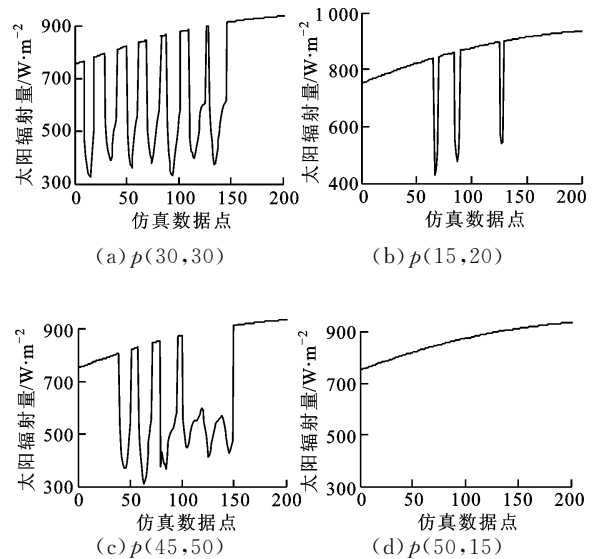


图 5 不同网格的太阳辐射量仿真结果

$p(45,50)$ 受到的影响很大,说明网格 $p(45,50)$ 在云层运动的路径上。网格 $p(45,50)$ 与网格 $p(45,50)$ 的辐射量输出也说明了类似的影响。此外,网格 $p(50,15)$ 的辐射量并未受到云层影响,说明云层并未飘过网格 $p(50,15)$ 。因此,耦合映射格云模型能够有效模拟云层对太阳辐射的波动性影响。

3.2.2 PM2.5 影响下的辐射量曲线分析 PM2.5 是一种典型的大气溶胶,指粒径在 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下的细颗粒物。PM2.5 能反射太阳光,减少射向地球的太阳短波辐射能量。根据文献[15]中不同气溶胶的衰减因子修改模型中的 $\alpha^{(n)}(x,y)$ 与 $\beta^{(n)}(x,y)$ 后,得到 PM2.5 影响下的辐射量曲线如图 6 所示。

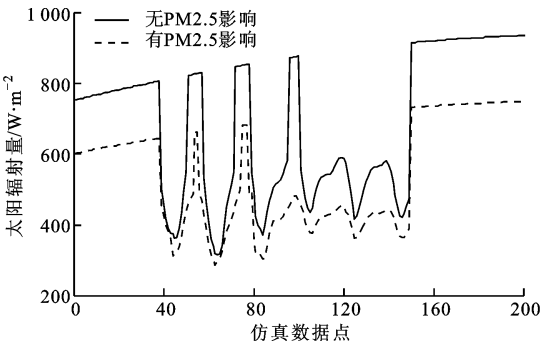


图 6 PM2.5 对太阳辐射量的影响

由图 6 可知,PM2.5 使得空气变得更加浑浊,减弱了云层运动对太阳辐射的影响,并降低了整体太阳辐射量。

3.2.3 辐射量随机特性分析 将满足正态分布的随机数作为云层的速度边界条件。在 3.2.1 节的基础上重复 200 次仿真实验,并固定采样时刻为 10:30,采集此时刻的 200 个仿真模拟点进行辐射量随机特性分析(此处不考虑 PM2.5 影响)。网格辐射量的随机特性如图 7 所示。

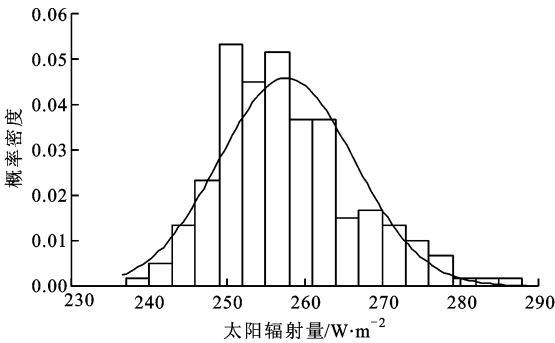


图 7 $p(5,15)$ 的太阳辐射量的概率密度分布

在 10:30,网格 $p(5,15)$ 位于运动云层的边缘位置,因此其辐射量的波动近似为服从正态分布的波

动,而位于云层内部的网格辐射量波动几乎为 0。可见,速度边界条件的改变对于云层边缘位置的网格辐射量影响很大,对于云层内部的网格状态量影响很小。

3.3 某光伏电站输出功率仿真分析

现以中国西北地区某 50 MW 光伏电站为例,分析云层运动对电站输出功率的影响。此光伏电站分为 50 个 1 MW 单位,覆盖面积为 50 hm^2 。每 21 个光伏组件串联成一行,每个单元约有 208 个串联的光伏组件。根据文献[16]的光伏组件模型,并控制每个光伏组件在确定的电压下工作,可依次计算单元或电站的输出功率。

3.3.1 电站输出功率曲线分析 首先研究单个 1 MW 单元的输出功率。每个 1 MW 单元平均占地 1 hm^2 ,由 4 368 个光伏组件构成。仿真时间仍为 10:00 至 12:00,此时间段内共取 200 个点进行模拟。云层在仿真实间内的运动时间为第 1 至第 150 个点。各个单元由于地理位置不同受到的云的影响也不同,因此各个单元的输出功率的波动大小也不同。不同单元的输出功率曲线如图 8 所示。

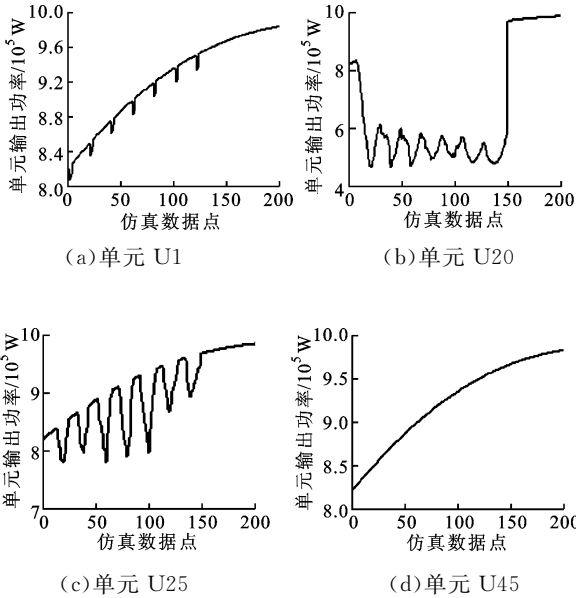


图 8 不同单元的输出功率仿真结果

将 50 个单元整合后得到 50 MW 光伏电站输出功率如图 9。由图 9 可知,云对电站总输出功率的衰减约为 17.7%。

对比图 8 与图 9 可以发现,50 个含不同波动幅度大小的单元输出功率经过整合后得到的光伏电站输出功率波动得到了抑制。光伏电站的波动最大值约为平均输出功率的 1.3%,而对于单个 1 MW 单

元,波动最大值约为平均输出功率的12.2%。因此,经过汇流,电站总输出功率波动幅度约为单元输出功率平均波动幅度的10.8%。这一结果验证了文献[17]所提到的将不同小区域范围内输出功率整合后得到的大区域输出功率的波动小于前者的波动。

在PM2.5影响下,电站输出功率比无PM2.5影响下的电站输出功率更低,且功率曲线更为平滑。

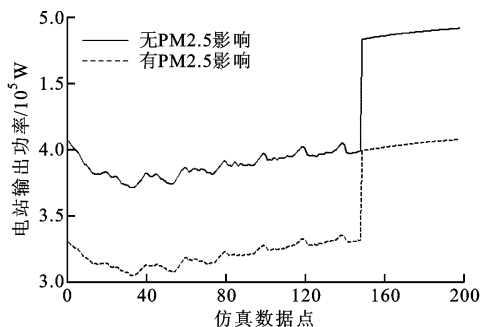


图9 光伏电站输出功率仿真结果

3.3.2 输出功率随机特性分析 考虑服从正态分布的速度边界条件对于电站输出功率的影响,重复200次仿真实验,固定采样时刻为10:30,采集此时刻的200个仿真模拟点进行输出功率的随机特性分析,此处不考虑PM2.5影响,结果如图10所示。

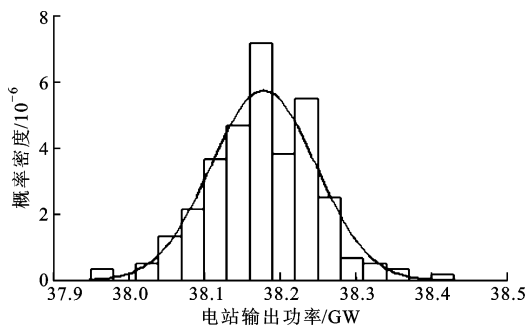


图10 光伏电站输出功率的概率密度分布

图10说明,满足正态分布的云层速度边界条件能够在电站输出功率的随机特性中得到一定的体现。

4 结论

光伏电站输出功率的随机特性对于电力系统的稳定有着重大的意义。在ASHRAE晴天太阳辐射模型的基础上,利用了基于Navier-Stokes动力学方程组的耦合映射格云模型,将时间空间进行离散化后求解了云层运动过程,并结合云对于太阳辐射的衰减因子,得到了云层影响下的太阳辐射模型。由于目前实际光伏电站的面积在平方千米数量级,耦

合映射格云模型在利用较少的网格数前提下能够有效完成量化模拟,并保证较低的计算复杂度。考虑云层运动的光伏电站输出功率的仿真结果表明:云对电站总输出功率的衰减约为17.7%;PM2.5可使光伏电站的输出功率整体降低;整合多个不同波动性光伏发电量后的总发电量更为平滑,电站总输出功率波动幅度约为单元输出功率平均波动幅度的10.8%。采用本文模型对不同气候影响下的光伏电站输出功率进行分析,可作为下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 王守相,张娜. 基于灰色神经网络组合模型的光伏短期处理预测[J]. 电力系统自动化, 2012,36(19):37-41.
WANG Shouxiang, ZHANG Na. Short-term output forecast of photovoltaic based on a grey and neural network hybrid model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(19):37-41.
- [2] 汪宏七,赵高祥. 云和辐射:I 云气候学和云的辐射作用[J]. 大气科学, 1994,18(S):910-931.
WANG Hongqi, ZHAO Gaoxiang. Cloud and radiation I: Cloud climatology and radiative effects of clouds [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1994,18(suppl): 910-931.
- [3] 申彦波,赵宗慈,石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. 地球科学进展, 2008,29(9):915-923.
SHEN Yanbo, ZHAO Zongci, SHI Guangyu. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects [J]. Advances in Earth Science, 2008,23(9):915-923.
- [4] 代倩,段善旭,蔡涛,等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(34):28-35.
DAI Qian, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Short-term PV generation system forecasting model without irradiation based on weather type clustering [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011,31(34):28-35.
- [5] 姚海,鲍劲松,金烨. 基于元胞自动机的云层实时模拟[J]. 系统仿真学报, 2008,20(11):2946-2950.
YAO Hai, BAO Jinsong, JIN Ye. Real-time simulation of volumetric cloud on cellular automation [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(11): 2946-2950.
- [6] DOBASHI Y, KANEDA K, YAMASHITA H, et al. A simple, efficient method for realistic animation of

- clouds [C]//Proceedings of SIGGRAPH 2000. New York, USA: ACM, 2000:19-28.
- [7] STAM J. Stable fluids [C]//Proceedings of SIGGRAPH 99, New York, USA: ACM, 1999:121-128.
- [8] MIYAZAKI R, YOSHIDA S, DOBASHI Y, et al. A method for modeling based on atmospheric fluid dynamics [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Graphics and Applications, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001:363-372.
- [9] 李锦萍,宋爱国. 北京晴天太阳辐射模型与ASHRAE模型的比较[J]. 首都师范大学学报:自然科学版, 1998,19(1):35-38.
- LI Jinping, SONG Aiguo. Compare of clear-day solar radiation model of Beijing and ASHRAE [J]. Journal of Capital Normal University, 1998,19(1):35-38.
- [10] ANDERSON J D. 计算流体力学入门[M]. 姚朝晖,周强,编译. 北京:清华大学出版社, 2010:31-64.
- [11] HARRIS M J. Real-time cloud simulation and rendering [D]. Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill, 2003.
- [12] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 2008:353.
- [13] STEVEN A A, GRAEME L S. The absorption of solar radiation by cloud droplets:an application of anomalous diffraction theory [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986,44(12):1574-1588.
- [14] National Renewable Energy Laboratory. Measurement and instrumentation data center [DB/OL]. [2012-04-11] <http://www.nrel.gov/midc/apps/plot.pl?site=STAC&start=20110211&edy=23&emo=1&eyr=2013&zenloc=25&amsloc=27&year=2012&month=4&day=9&endyear=2012&endmonth=4&endday=10&time=1&inst=3&inst=4&inst=5&inst=6&type=plot&first=3&math=0&second=-1&value=0.0&global=-1&direct=-1&diffuse=-1&user=0&axis=1>.
- [15] 胡丽琴,刘长盛. 云层与气溶胶对大迁移吸收太阳辐射的影响[J]. 高原气象, 2001,20(3):264-270.
- HU Liqin, LIU Changsheng. The influence of cloud layer and aerosol on absorption of solar radiation [J]. Plateau Meteorology, 2001,20(3):264-270.
- [16] 杨秀媛,刘小河,张芳,等. 大型太阳能并网发电模型及应用[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(S):19-22.
- YANG Xiuyuan, LIU Xiaohu, ZHANG Fang, et al. Model of large PV and its applications on power system analysis [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011,31(suppl):19-22.
- [17] MILLS A, AHLSTROM M, BROWER M, et al. Dark shadows [J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2011,9(3):62-70.

(编辑 刘杨)

(上接第6页)

- ifying Web service using Pi-calculus [J]. Chinese Journal of Computers, 2005,28(4):635-643.
- [8] DING W, WANG J, HAN Y. ViPen: a model supporting knowledge provenance for exploratory service composition [C]//Proceedings of the IEEE ICSC 2010. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010:265-272.
- [9] MILLER G, EVANS A, JACOBSON I, et al. Model driven architecture: how far have we come, how far can we go? [C]//Proceedings of the OOPSLA'03 Companion of the 18th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-oriented Programming, Systems, Languages, and Applications. New York, USA: ACM, 2003:273-274.
- [10] FUJII K, SUDA T. Semantics-based context-aware dynamic service composition [J]. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2009,4(2):1-31.
- [11] CHABEB Y, TATA S, OZANNE A. YASA-M: a semantic web service matchmaker [C]//Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010:966-973.
- [12] SHENG Q Z, BENATALLAH B, DUMAS M, et al. SELF-SERV: a platform for rapid composition of web services in a peer-to-peer environment [C]//Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Databases. Hong Kong, China: Morgan Kaufmann, 2002:1051-1054.
- [13] EZENWOYE O, SADJADI S M, CARY A, et al. Grid service composition in BPEL for scientific applications [M]//Lecture Notes in Computer Science: Vol. 4804. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2002:1304-1312.
- [14] ZHEN L, PARASHAR M. An infrastructure for dynamic composition of grid services [C]//Proceedings of the IEEE GCC 2006. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:315-316.

(编辑 荆树蓉 武红江)