

文章编号:1672-3961(2025)05-0070-08

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.203

# 考虑日食过境影响的光伏出力与爬坡速率预测方法

陈浩然<sup>1</sup>, 祁鑫<sup>2</sup>, 田志浩<sup>2</sup>, 李桐<sup>2</sup>, 刘刚<sup>2</sup>, 李常刚<sup>1\*</sup>

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 2. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

**摘要:** 准确预测日食过境期间光伏的出力与爬坡速率对于缓解系统调峰压力、维持系统的电力电量平衡具有重要意义。提出一种日内太阳辐射强度模型构建方法,用于表征某地太阳辐射强度日内特性;分别构建日全食、日环食、日偏食过境情况下的太阳遮挡率模型,修正日内太阳辐射强度模型;提出一种考虑温度对于光伏效率影响的光伏出力模型,给出光伏机组的爬坡速率与计算模型。算例部分以2020年6月21日发生于我国的日环食事件为例,对某省100 kW光伏场站出力情况进行反演分析,验证所提方法的有效性。探究不同遮挡程度的日食对于光伏爬坡速率的影响,指出遮挡程度越大的日食所对应的光伏爬坡速率越高,日全食下甚至可达正常情况的4倍以上,需要调度人员高度重视。

**关键词:** 日食; 太阳辐射强度; 遮挡率; 光伏出力; 光伏爬坡速率

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**引用格式:** 陈浩然, 祁鑫, 田志浩, 等. 考虑日食过境影响的光伏出力与爬坡速率预测方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2025, 55(5): 70-77.

CHEN Haoran, QI Xin, TIAN Zhihao, et al. Method for predicting photovoltaic generation and ramp rate considering the impact of solar eclipse transit[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5): 70-77.

## Method for predicting photovoltaic generation and ramp rate considering the impact of solar eclipse transit

CHEN Haoran<sup>1</sup>, QI Xin<sup>2</sup>, TIAN Zhihao<sup>2</sup>, LI Tong<sup>2</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, LI Changgang<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, Shandong, China; 2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, Ningxia, China)

**Abstract:** Accurately predicting the output and ramp rate of photovoltaic (PV) systems during an eclipse is of significant importance for alleviating peak-shaving pressure and maintaining the balance of power consumption. A method for constructing an intra-day solar radiation intensity model was proposed, which characterized the daily characteristics of solar radiation intensity at a certain location. Subsequently, models for the shading percentage of the sun during total, annular, and partial eclipses were respectively established to update the intra-day solar radiation intensity model. Next, the PV generation model considering the impact of temperature on efficiency was introduced, along with the ramp rate and calculation models for PV units. In the case study section, the annular eclipse event that occurred on June 21, 2020, in China was used as an example to retrospectively analyze the output of a 100 kW PV station, thereby validating the effectiveness of the proposed method. Furthermore, the study explored the impact of different percentages of eclipse obscuration on the PV ramp rate, indicating that eclipses with greater obscuration corresponded to higher PV ramp rates. The PV ramp rate under a total solar eclipse was found to even reach more than 4 times the normal situation, and dispatch personnel were required to attach great importance to it.

**Keywords:** solar eclipse; solar radiation intensity; shading percentage; PV generation; PV ramp rate

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(5108-202218280A-2-266-XG)

第一作者简介: 陈浩然(2000—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为极端天气下的电力系统安全风险评估。

E-mail: chenhaoran2022@mail.sdu.edu.cn

\* 通信作者简介: 李常刚(1984—), 男, 山东日照人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统运行与控制。

E-mail: lichgang@sdu.edu.cn

## 0 引言

截至2024年底,我国风电装机容量约5.2 GW,光伏装机容量约8.9 GW<sup>[1]</sup>。预计到2035年,光伏总装机容量将超30 GW;到2050年,光伏总装机容量将超50 GW,占全国发电总装机容量的59%。

光伏装机规模与发电渗透率的持续攀升将会给电力系统运行带来一系列挑战<sup>[2-3]</sup>。其中,能够引发光伏出力显著波动的日食事件便是对于系统运行的一大考验<sup>[4]</sup>。在日食过境期间,地表受到的太阳辐射强度先是快速下降,食甚后又迅速增加<sup>[5]</sup>,光伏机组在短时间内连续经历下爬坡与上爬坡事件<sup>[6-7]</sup>。在下爬坡期间,若光伏机组减少的出力超过了常规机组增发的出力,便会造成负荷的削减<sup>[8]</sup>。在上爬坡期间,光伏出力的快速增加会使得系统的有功发出量远超负荷需求,从而造成弃光事件。除此之外,日食过境期间光伏机组的爬坡速率远远高于正常运行状态,甚至可能超出限值造成机组停机,给电力系统的调峰和电力电量平衡带来压力<sup>[9]</sup>。

日食过境影响电力系统的事件常有发生<sup>[10]</sup>。2015年3月,过境欧洲的一次日全食对德国电力系统产生了严重影响<sup>[11]</sup>。在日食期间,德国的光伏出力在短时间内骤减12 GW。随着日食结束,太阳辐射强度的突然增加又导致短时间内光伏出力迅速增加19 GW,光伏爬坡速率一度达到了正常运行状态下的14倍。2020年6月21日,我国也发生了一次罕见的日环食过境,环食带经西藏、四川、湖南、江西、福建等自西向东横穿中国,期间国家电网公司经营省份的光伏出力总损失极值达60 GW<sup>[12]</sup>。在此情况下,各省大量水火电机组增开发电,部分功率缺额较大的省份甚至通过联络线功率支援维持电网稳定。

不难看出,如果能够在日食发生前预先得到日食过境期间的光伏出力变化情况,就能够提前评估光伏发电量的损失以及机组的爬坡速率,这对于调度部门缓解调峰压力、维持系统电力平衡具有重要意义。目前,有多位学者聚焦该领域,取得重要研究成果。文献[12]基于再分析气象数据获得理想晴空状态下的太阳辐射强度,然后利用Andrew Richards模型,对2020年6月21日过境中国的日环食事件进行了反演分析,模型预测的光伏出力与实际出力数据基本相吻合。文献[13]提出预测日食期间太阳遮挡率的Andrew Richards模型,该模型

通过已知的日食信息,采用数学推导方式计算日食过境期间的太阳盘面被覆盖面积与其总面积之比。文献[14]在Andrew Richards模型的基础上,进一步考虑太阳入射角度变化的影响,首先计算正常无日食状态下光伏板能够接受到的太阳辐射强度,而后考虑日食影响,预测2017年8月21日美国纽约州某4.85 kW光伏场站在日食过境期间的出力变化情况,具有较高预测精度。

本研究同样基于Andrew Richards模型展开,但需要指出的是,在计算日食过境期间的太阳遮挡率时,该模型假定太阳和月球两盘面的半径比为定值,并通过计算 $t$ 时刻被遮挡的太阳盘面面积与太阳盘面总面积的比值,来确定 $t$ 时刻的太阳遮挡率。然而,这种假设并未根据不同的日食类型对比值的变化情况进行分类讨论,因而存在一定误差。鉴于此,本研究对该模型进行改进,分别依照日全食、日环食、日偏食3类日食事件下太阳盘面与月球盘面的几何关系构建遮挡率模型,实现对日食过境期间太阳辐射强度的修正。

## 1 日内太阳辐射强度模型

文献[15]表明,某地区一天内地表受到的太阳辐射强度(简称日内太阳辐射强度) $G_s(t)$ 满足下述特征。

### (1) 对称性

若不考虑天气变化、云层遮挡等原因导致的辐射衰减,某日太阳辐射强度在上午、下午呈现典型的对称特性,太阳辐射强度为

$$G_s(t_{\max} + \Delta t) = G_s(t_{\max} - \Delta t), \quad (1)$$

式中: $G_s$ 为太阳辐射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $t_{\max}$ 为太阳辐射强度最大的时刻,通常取 $t_{\max} = 12 \text{ h}$ ;  $\Delta t$ 为一个时间区间。

### (2) 区间单调性

太阳辐射强度在一天内呈现先增后减的特性,即区间单调性质,表示为

$$\begin{cases} \frac{dG_s(t)}{dt} > 0 & t_{\text{rise}} \leq t \leq t_{\max} \\ \frac{dG_s(t)}{dt} < 0 & t_{\max} \leq t \leq t_{\text{fall}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $G_s(t)$ 为 $t$ 时刻的太阳辐射强度值, $t_{\text{rise}}$ 为日出时间, $t_{\text{fall}}$ 为日落时间。

由于日内太阳辐射强度曲线表现出典型的区间单调特性,因此可采用二次函数、高斯函数、正弦函数等具有该特性的函数来描述日内太阳辐射强

度的变化规律。各函数表达式如表1所示。

表1 函数类型及表达式

Table 1 Function types and expressions

函数类型	函数表达式
二次函数	$G_s(t) = at^2 + bt + c$
高斯型函数	$G_s(t) = A \exp\left[-\frac{(t-B)^2}{2C^2}\right] + D$
正弦型函数	$G_s(t) = \alpha \sin(\omega t + \theta) + \beta$

表1中各函数参数可通过拟合的方法获得,此处以高斯型函数表征日内太阳辐射强度变化特性,介绍具体的参数拟合流程。

太阳辐射强度可表示为

$$G_s(x; t) = x_1 \exp\left[-\frac{(t-x_2)^2}{2x_3^2}\right] + x_4, \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间;  $x_1, x_2, x_3, x_4$  为待求高斯分布函数的模型参数。

假设在一天内共选择了  $m$  组时间数据,且各时刻的太阳辐射强度实际值为  $y(t)$ ,采用最小二乘法最小化数据残差平方和的优化目标可表示如下:

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [y(t_j) - G_s(x; t_j)]^2 = \frac{1}{2} \|f(x)\|^2, \quad (4)$$

式中,  $m$  为数据组数,  $t_j$  为时间点,  $y(t_j)$  为  $t_j$  时的数据实测值,  $f(x)$  为残差向量。

式(4)可进一步表示为

$$\min_x F(x) = \min_x \frac{1}{2} \|f(x)\|^2. \quad (5)$$

求解上述优化问题有如下两种方法。

(1) 通过解析方法求解。令  $dF(x)/dx = 0$ , 求  $x$  的值。当  $F(x)$  表达式过于繁琐时,此方法一般难以实现解析求解。

(2) 基于高斯-牛顿思想进行迭代计算。首先,对  $f(x)$  进行一阶泰勒展开,取一阶线性项近似:

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + f'(x) \Delta x = f(x) + J(x) \Delta x. \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得

$$\frac{1}{2} \|f(x) + \Delta x\|^2 =$$

$$\frac{1}{2} [f(x)^T f(x) + 2f(x)^T J(x) \Delta x + \Delta x^T J(x)^T J(x) \Delta x]. \quad (7)$$

对式(7)求导,并令导数为0,可得

$$J(x)^T J(x) \Delta x = -J(x)^T f(x). \quad (8)$$

解得

$$\Delta x = [J(x)^T J(x)]^{-1} [-J(x)^T f(x)] = H^{-1} B. \quad (9)$$

式中:  $J(x)$  为雅可比矩阵;  $H$  为近似海森矩阵,  $H = J(x)^T J(x)$ ; 矩阵  $B$  为梯度方向的负值。

经历  $k$  次迭代后,判断  $\Delta x^k$  是否小于预先设定的阈值  $\varepsilon$ 。若满足,则结束迭代,同时输出  $x = x^k + \Delta x^k$ ; 否则,迭代继续,直到迭代  $n$  次后  $\Delta x^n$  小于设定阈值  $\varepsilon$ , 或者迭代次数  $k$  超过最大限制  $k_{\max}$ , 迭代终止。

## 2 日食过境期间太阳遮挡率模型

考虑日食过境的影响,只需依据日食过境期间的太阳遮挡率  $f(t)$  对原有的太阳辐射强度  $G_s(t)$  进行修正即可,修正后的太阳辐射强度为<sup>[12]</sup>

$$G'_s(t) = \begin{cases} G_s(t) [1 - f(t)] & t_{\text{start}} < t < t_{\text{end}} \\ G_s(t) & t < t_{\text{start}} \text{ OR } t > t_{\text{end}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中,  $G'_s(t)$  为修正后的太阳辐射强度,  $G_s(t)$  为修正前的太阳辐射强度,  $f(t)$  为太阳遮挡率,  $t_{\text{start}}$  和  $t_{\text{end}}$  分别表示日食过境开始与结束时间。

因此,模拟日食过境期间太阳辐射强度变化的关键在于构建一个能够描述日食期间太阳遮挡率动态变化的模型  $f(t)$ 。

### 2.1 模型构建

在地球上,太阳与月球的视大小基本相同,这是由于太阳直径和月球直径之比与日地距离和月地距离之比非常接近于1。但实际上,月球绕地球公转的椭圆轨道存在近地点与远地点之分。在月球公转轨道的近地点,在地表观测到的月球盘面约为太阳盘面的1.0253倍;在月球公转轨道的远地点,在地表观测到的月球盘面约为太阳盘面的0.9225倍。

然而,现有研究在构建日食事件下的太阳遮挡率模型时,默认太阳盘面与月球盘面半径之比为定值1,并将  $t$  时刻日盘被遮挡面积与其总面积的比值作为  $t$  时刻的太阳遮挡率。这种假设未依照日食类型的不同对太阳盘面与月球盘面半径比值进行分类讨论,在计算过程中会造成-7.75%~+2.53%的计算误差,进而影响后续光伏出力预测。日偏食作为最一般的日食事件,可能单独出现,也可能伴随日环食出现。本节主要讨论日偏食过境期间的太阳遮挡率模型构建方法<sup>[15]</sup>。

日偏食情况下,假设日盘半径为1,月盘半径为  $r$ 。日偏食过境如图1所示。图1中:  $d$  为太阳盘面与月盘盘面重合达最大时两盘面中心距离的一半;  $t_{\text{overlap}}$  为两盘面重合面积最大的时刻,有  $t_{\text{overlap}} =$

$(t_{start}+t_{end})/2$ ;  $a(t)$  为  $t$  时刻月盘中心距  $t=t_{overlap}$  时刻月盘中心的距离;  $M_c$  代表月盘中心;  $S_c$  代表日盘中心。

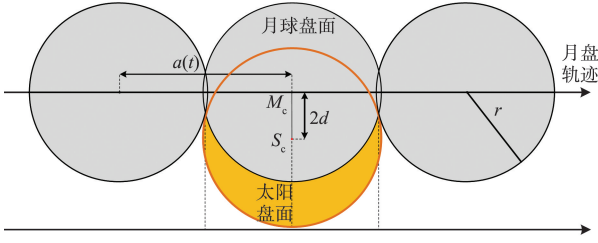


图1 日偏食过境过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the transit process of the partial solar eclipse

如此,计算遮挡率  $f(t)$  便转换为计算  $t$  时刻月球盘面与太阳盘面的重合面积  $S(t)$  与太阳盘面自身面积  $S_{sun}$  比值这一数学问题,日偏食下日盘与月盘几何关系如图2所示。

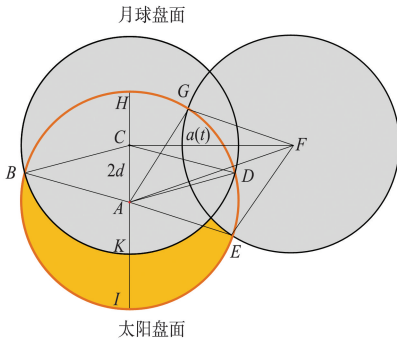


图2 日偏食下,日盘与月盘几何关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of the geometric relationship between solar disk and lunar disk during partial solar eclipse

$t$  时刻两盘面的重叠面积  $S(t)$  的计算公式为

$$S(t) = S_{\widehat{AEG}} + S_{\widehat{FEG}} - S_{\square AEPG} = \cos^{-1} \left[ \frac{\sqrt{d^2 + \frac{a^2(t)}{4}}}{r} \right] (r^2 + 1) - 2\sqrt{r^2 - (d^2 + \frac{a^2(t)}{4})} \sqrt{d^2 + \frac{a^2(t)}{4}} \quad (11)$$

式(11)中的  $a(t)$  的计算公式为

$$a(t) = \sqrt{(r+1)^2 - 4d^2} \left[ 2 \left( \frac{t - T_{start}}{T_{end} - T_{start}} \right) - 1 \right] \quad (12)$$

因此,日偏食事件下的太阳遮挡率计算公式为

$$f(t) = \frac{1}{\pi} \left[ (r^2 + 1) \cos^{-1} \frac{\sqrt{d^2 + \frac{a^2(t)}{4}}}{r} - 2\sqrt{r^2 - (d^2 + \frac{a^2(t)}{4})} \sqrt{d^2 + \frac{a^2(t)}{4}} \right] \quad (13)$$

同理可推导日全食与日环食过境期间的太阳

遮挡率模型,所得公式与式(13)完全一致,推导过程不再在正文中赘述。

### 2.2 模型参数计算

虽然不同类型日食下太阳遮挡率表达式  $f(t)$  形式相同,但  $f(t)$  参数的具体取值却不尽相同。对于  $r$ 、 $t_{start}$  和  $t_{end}$ ,可从日食过境前夕天文机构所发布的日食过境信息中获得。然而,参数  $d$  并未在日食过境信息中提供,因此需要通过其他信息间接推算。

(1) 由最大食分值求参数  $d$

引入食分这一概念,食分  $M(t)$  表示太阳在日食过程中被遮挡部分的直径与太阳视直径的比值。在日全食过程中,  $M(t) \geq 1$ ,而在日环食和日偏食中,  $M(t) < 1$ 。

如图2所示,当  $t=t_{overlap}$  时,月盘与日盘中心间距取最小值  $2d$ ,对应食分为最大食分值  $M(t_{overlap})$ ,其计算公式可表示为

$$M(t_{overlap}) = \frac{L_{HK}}{L_{HI}} = \frac{1+r-2d}{2} \quad (14)$$

式中,  $L_{HK}$  与  $L_{HI}$  分别对应图2中线段 HK 与 HI 的长度。

由于  $r$  与  $M(t_{overlap})$  均可从日食过境相关信息中获取,由此可间接计算参数

$$d = \frac{1+r-2M(t_{overlap})}{2} \quad (15)$$

(2) 由最大遮挡率求参数  $d$

如图2所示,当  $t=t_{overlap}$  时,有最大遮挡率

$$f(t_{overlap}) = \frac{[(r^2+1) \cos^{-1} d - 2d\sqrt{r^2-d^2}]}{\pi} \quad (16)$$

同理,由于  $r$  与  $f(t_{overlap})$  均可从日食过境相关信息中获取,由此可由式(16)推导计算参数  $d$ 。由于此过程并非解析可逆的,因此通常采用数值方法求解。

## 3 日食过境期间光伏场站出力与机组爬坡速率模型

### 3.1 光伏场站出力模型

光伏出力与光伏板接受的太阳辐射强度成线性正相关关系,场站的出力表达式为<sup>[15]</sup>

$$P_{pv}(t) = \eta_T \eta_o \frac{G_s(t)}{G_{s,ref}} P_{peak} \quad (17)$$

式中:  $P_{pv}(t)$  为  $t$  时刻的光伏机组出力;  $\eta_T$  为光伏效率的温度系数;  $\eta_o$  为其它修正系数;  $G_{s,ref}$  代表标准状况下的太阳辐射强度,通常取  $1000 \text{ W/m}^2$ ;  $P_{peak}$  为场站的总装机容量。

当温度较高时,光伏发电的效率将下降,即  $\eta_T$  将减小<sup>[16]</sup>。有研究表明,在 20~100 °C,光伏组件温度每升高 1 °C,效率下降 0.35%~0.5%,因此  $\eta_T$  随光伏组件温度变化关系可表示为<sup>[17]</sup>

$$\eta_T(T) = \eta_{T,STC} - \alpha_T(T-25), \quad (18)$$

式中: $T$  为光伏组件的温度; $\eta_{T,STC}$  为 25 °C 标准状况下的温度系数; $\alpha_T$  为温度计算系数,取值范围为 0.35%~0.5%。

需要指出的是,环境温度并不等同于光伏组件温度。光伏组件温度  $T$  受到环境温度  $T_{env}$ 、太阳辐射强度  $G_s$ 、风速  $v_{env}$ 、湿度  $\varphi_{RH}$  等多种因素的共同影响。因此,可构建光伏组件温度  $T$  与  $T_{env}$ 、 $G_s$ 、 $v_{env}$ 、 $\varphi_{RH}$  的关系方程<sup>[18]</sup>

$$T = a_1 T_{env} + a_2 G_s - a_3 v_{env} + a_4 \varphi_{RH} - a_5, \quad (19)$$

式中: $T_{env}$  为环境温度; $G_s$  为太阳辐射强度; $v_{env}$  为风速; $\varphi_{RH}$  为相对湿度; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  为模型参数。

可基于海量多源气象数据,拟合该方程式模型参数,并评估拟合优度指标。

### 3.2 光伏爬坡速率分析

日食过境期间,光伏出力变化显著,通常采用爬坡速率  $R_{rate}$  作为光伏机组出力变化的量化指标<sup>[19-20]</sup>。光伏爬坡事件的量化描述通常包含以下参数:功率变化值  $\Delta P_{pv}$ 、爬坡开始时间  $t_1$ 、爬坡结束时间  $t_2$ 、爬坡持续时间  $\Delta t = t_2 - t_1$ 、爬坡速率  $R_{rate}$ 、爬坡方向。其中,光伏爬坡速率是衡量爬坡事件发生与否的重要标准。调度部门通常用一段时间内的平均爬坡速率作为光伏出力变化的量化指标,其被定义为一段时间  $t \in [t_1, t_2]$  内机组出力的差值  $P_{pv}(t_2) - P_{pv}(t_1)$  与该段时间  $t_2 - t_1$  的比值,表示如下<sup>[21]</sup>:

$$R_{rate} = \frac{P_{pv}(t_2) - P_{pv}(t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (20)$$

式中, $P_{pv}(t_1)$  与  $P_{pv}(t_2)$  分别为  $t_1$  与  $t_2$  时刻的光伏机组功率。

文献[22]指出,爬坡速率计算时间间隔  $\Delta t$  可设置为 15 min、30 min 或 1 h 等。由于调度部门用于新能源出力预测的时间尺度通常为 15 min,因此本研究定义的爬坡速率计算时间间隔  $\Delta t$  亦取 15 min。

除式(20)所示的平均爬坡速率外,还可定义光伏机组的瞬时爬坡速率,其可通过光伏出力  $P_{pv}(t)$  对时间  $t$  求导得到,即

$$R_{rate}(t) = \frac{dP_{pv}(t)}{dt}. \quad (21)$$

由于瞬时爬坡速率只能反映某个时间点上的光伏爬坡速率,无法反映一段时间区间内的爬坡速率平均水平。因此,本研究采用一段时间内的平均爬坡速率作为光伏机组的爬坡速率指标。

日食开始阶段,光伏出力因太阳辐射强度的下降而迅速下降,此时  $R_{rate} < 0$ ,称之为下坡;日食结束阶段,光伏出力又因太阳辐射强度的上升而迅速上升,此时  $R_{rate} > 0$ ,称之为上坡。

不管是下坡还是上坡,均可能对系统的稳定性造成影响,因此要对爬坡事件做出辨识。目前常用的辨识方法通常是比较  $R_{rate}$  与设定阈值  $R_{threshold}$ ,当  $|R_{rate}| > R_{threshold}$  时即认为爬坡事件发生。

## 4 算例分析

### 4.1 数据介绍

以 2020 年 6 月 21 日过境我国的日环食为例,选用位于甘肃省临夏县的某两个装机容量均为 100 kW 的光伏场站作为研究对象。由于两场站地理位置相近,因此认为两场站的经纬度坐标均为 (35°28'N, 103°02'E)。光伏场站所在地表现为日偏食过境,相关信息如表 2 所示<sup>[23]</sup>。

表 2 日食过境信息

Table 2 Eclipse transit information

参数	取值	含义
$t_{start}$	14:01:55	初亏(日食开始)
$t_{overlap}$	15:30:48	食甚(遮挡最大)
$t_{end}$	16:59:40	复圆(日食结束)
$M(t_{overlap})$	0.812 92	最大食分
$f(t_{overlap})$	76.1%	最大遮挡率
$r$	0.991 74	月日半径比例

### 4.2 太阳辐射强度模型构建

从国家气象中心官网获取该地当天的太阳辐射强度原始数据<sup>[24]</sup>,选用 1.1 节中所提二次函数、高斯型函数、正弦型函数,基于非线性最小二乘法拟合函数参数,并计算拟合优度。参数拟合结果如表 3 以及图 3 所示。

表 3 参数拟合结果

Table 3 Parameter fitting results

拟合函数	参数值	拟合优度
二次函数	$a = -20.9$ , $b = 482.8$ , $c = -1\ 943.1$	$R^2 = 0.9747$ $R_{MSE} = 48.542\ 6$
高斯型函数	$A = 1138.1$ , $B = 11.6$ , $C = 2.76$ , $D = -221.2$	$R^2 = 0.997\ 0$ $R_{MSE} = 17.517\ 0$
正弦型函数	$\alpha = 475.7$ , $\omega = 0.4$ , $\theta = 3.4$ , $\beta = 437.7$	$R^2 = 0.998\ 6$ $R_{MSE} = 12.152\ 0$

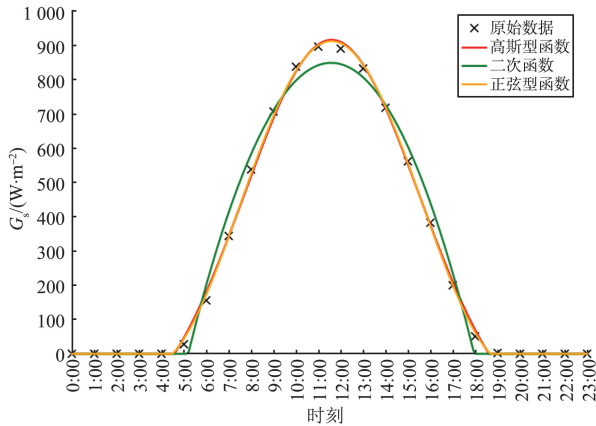


图3 太阳辐射强度拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of solar radiation intensity

由表3可见,二次函数的拟合效果较其它函数稍差,这是由于二次函数离对称轴的位置越远斜率越大。而实际的太阳辐射强度在日出时通常增加较为缓慢,二次函数无法表征出上述特性,因此拟合效果较差。由于正弦型函数为三参数分布,较四参数的高斯型分布而言计算更加简便,因此本节采用正弦型函数表征该地太阳辐射强度的日内变化特性。

图3所得曲线是假定无日食过境情况下理论上能够到达地表的辐射强度。若要获取实际到达地表的辐射强度,必须考虑日食过境对于太阳遮挡的影响。因此,将表2中的参数代入式(13)计算该地日食过境期间的时变遮挡率,式中参数 $d$ 可按式(15)间接求解,计算结果为 $d=0.18295$ 。

图4给出了日偏食过境期间太阳遮挡率时变曲线 $f(t)$ 。在整个日食过境过程,太阳遮挡率呈现先增后减的趋势,并以食甚时间为轴左右对称。据此可对 $t$ 时刻太阳辐射强度进行修正。

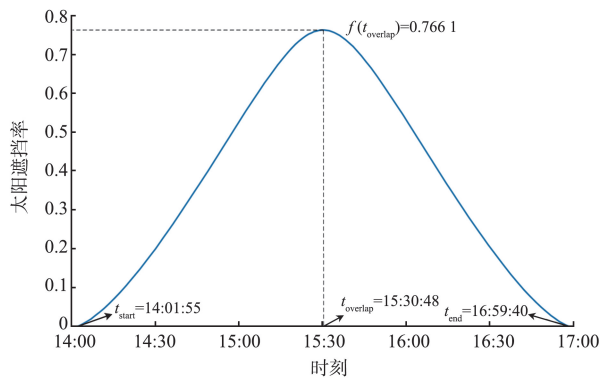


图4 太阳遮挡率变化曲线

Fig.4 Curve of sun's shading percentage

### 4.3 光伏场站出力预测

在预测光伏场站出力时,式(17)、(18)的参数取值如下所示:修正系数 $\eta$ ,取定值0.95。计算温度

修正系数 $\eta_T$ 时,取 $\eta_{T,STC} = 1, \alpha_T = 0.35$ 。在对环境温度和光伏组件表面温度进行转化时,式(19)的参数取值如下: $a_1 = 0.851, a_2 = 0.0037, a_3 = -0.421, a_4 = 0.248, a_5 = -17.418$ 。

图5给出了光伏场站的出力曲线,其中蓝色曲线为无日食过境的光伏场预测出力,由未经遮挡率 $f(t)$ 修正的太阳辐射强度 $G_s(t)$ 计算得来;橙色曲线为有日食过境的光伏场站预测出力,由修正后的太阳辐射强度 $G'_s(t)$ 计算得来;绿色与灰色曲线分别为光伏场站1和场站2当天的实测出力曲线。

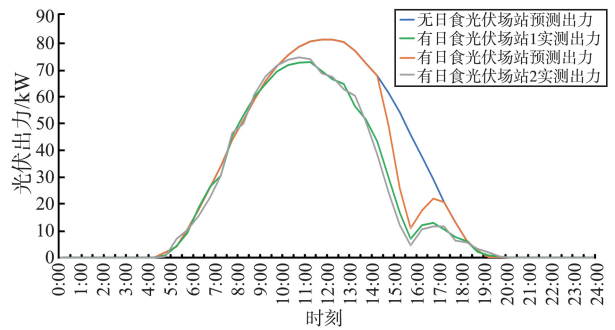


图5 光伏场站出力曲线

Fig.5 Curve of photovoltaic station generation

由图5可见,日食过境期间的光伏出力预测曲线与两光伏场站的实测出力曲线大致吻合,曲线未完全重合的原因是由于日食过境当天该地天气为晴转小雨,接近正午时天气由晴转阴,午后开始下起小雨,一直持续到傍晚。预测曲线与实测曲线在上午晴天时保持高度吻合,而天气转阴后预测曲线始终高于实测曲线,二者之差即为阴雨天气导致的光伏出力预测误差。

虽然阴雨天气导致了一定的预测误差,但预测曲线与实测曲线的几个拐点是高度一致的,譬如 $t_{start} = 14:01:55, t_{overlap} = 15:30:48, t_{end} = 16:59:40$ ,分别对应于日食的初亏、食甚、复圆。对应于光伏出力曲线,当 $t > t_{start}$ 时,光伏出力迅速下降;当 $t > t_{overlap}$ 时,光伏出力由下降趋势变为上升趋势;当 $t > t_{end}$ 时,光伏出力不再受日食影响,预测曲线与实测曲线再次重合。

### 4.4 光伏爬坡速率分析

将日食过境全过程分为日食来临与日食离开阶段,两阶段的时间分隔点为 $t = t_{overlap}$ 。以光伏场站1为例,分别计算两阶段所对应的光伏爬坡速率数据,包括最大爬坡速率 $R_{rate\_max}$ 和平均爬坡速率 $R_{rate\_avg}$ 。此处所计算的爬坡速率为 $R_{rate}(\Delta t)$ ,计算公式见式(20), $\Delta t$ 取调度常用的15 min,结果展示如表4所示。

表4 光伏爬坡速率数据

Table 4 Data of photovoltaic ramp rate  
单位:W/min

量	爬坡速率		
	日食来临(下爬坡)	日食离开(上爬坡)	无日食
$R_{rate\_max}$	786.2	224.3	417.9
$R_{rate\_avg}$	671.3	205.4	203.4

注:表中数据均为绝对值。

日食过境期间,该场站光伏机组的最大爬坡速率可达正常情况下的1.9倍,平均爬坡速率可达正常情况下的3.3倍。由于此次日食发生于14~17时,太阳辐射强度随时间逐渐下降,因此光伏机组下爬坡速率较高而上爬坡速率较低。

可以预见的是,若日食于上午或正午时分过境,由于此时太阳辐射强度很高,光伏机组的爬坡速率相较于本次日食期间的爬坡速率势必显著增加,因此有必要对此展开探讨。此处仍以光伏场站1为例,假设日食于上午8~11时过境,并更加开放性地向日食地遮挡率设置为自变量,分别探究最大遮挡率为20%、40%、60%、80%、100%的日食过境对于光伏爬坡速率的影响。各类日食过境期间的光伏场站出力曲线如图6所示。

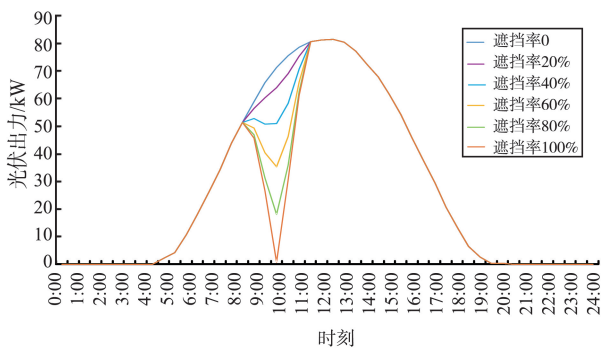


图6 不同遮挡率下的光伏场站出力曲线

Fig.6 Curve of photovoltaic station generation under different shading percentage

不同遮挡率日食过境期间的光伏爬坡速率数据如表5所示, $R_{rate\_max+}$ 为上爬坡速率的最大值、 $R_{rate\_avg+}$ 为上爬坡速率平均值, $R_{rate\_max-}$ 为下爬坡速率最大值、 $R_{rate\_avg-}$ 为下爬坡速率平均值。由表中可见,随着遮挡程度的增加,光伏的上下爬坡速率均会随之增加。特别指出,当遮挡率为100%的日全食过境时,光伏机组的最大爬坡速率达到了1 017 W/min,约为正常情况下的2.4倍,平均爬坡速率达到为889.8 W/min,达到了正常情况下的4.4倍。在此种情况下,异常的爬坡速率将可能导致系统的一系列稳定问题,需要调度人员高度重视。

表5 不同遮挡率下的光伏爬坡速率数据

Table 5 Data of photovoltaic ramp rate under different shading percentage 单位:W/min

量	爬坡速率				
	爬坡率 20%	爬坡率 40%	爬坡率 60%	爬坡率 80%	爬坡率 100%
$R_{rate\_max+}$	212.7	412.1	656.3	891.1	1 017.0
$R_{rate\_avg+}$	162.6	329.9	504.4	696.9	889.8
$R_{rate\_max-}$		66.7	299.3	517.7	865.9
$R_{rate\_avg-}$		14.3	179.3	311.8	564.6

注:爬坡速率数据均为绝对值。由于太阳辐射强度整体处于上升趋势,因此20%遮挡率下只存在上爬坡过程而不存在下爬坡过程。

## 5 结论

本研究提出一种考虑日食过境影响的光伏场站出力预测方法,可用于预测光伏场站在各类日食过境期间的出力及爬坡速率的变化情况,结论如下。

- (1)提出一种日内太阳辐射强度模型构建与参数计算方法。算例结果表明该模型具有较高的拟合精度,能够较好表征日内太阳辐射强度变化特性。
- (2)改进传统 Andrew Richards 模型,提出一种考虑不同类型日食过境影响的太阳遮挡率模型构建方法。

(3)提出一种日食过境期间的光伏场站出力与爬坡速率模型,能够有效预测日食过境期间的光伏出力与机组爬坡速率变化情况。

(4)基于甘肃省临夏县100 kW光伏场站进行实际案例分析,预测所得曲线与实测曲线具有较高的吻合度,验证所提方法的有效性。考虑到日食发生的随机性,进一步模拟不同遮挡程度的日食对于光伏爬坡速率的影响。结果表明,光伏的爬坡速率随着太阳遮挡程度的增大而升高,日全食情况下的爬坡速率甚至可达正常情况下的4倍以上,需要调度人员高度重视。

本研究所提方法的局限性是未能充分考虑气象因素对于模型预测误差的影响,使模型在阴雨天气下的预测精确度低于晴空天气。针对该问题,未来的研究思路是采用机理分析或是数据驱动的方法,将气象因素的影响纳入模型,进一步提高预测的准确度。

### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况 [EB/OL]. (2025-01-27) [2025-07-03]. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>
- [2] 和萍, 宫智杰, 靳浩然, 等. 高比例可再生能源电力系统调峰问题综述 [J]. 电力建设, 2022, 43(11):

- 108-121.  
HE Ping, GONG Zhijie, JIN Haoran, et al. Review of peak-shaving problem of electric power system with high proportion of renewable energy [ J ]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 108-121.
- [3] CHENG D L, MATHER B A, SEGUIN R, et al. Photovoltaic ( PV ) impact assessment for very high penetration levels [ J ]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(1): 295-300.
- [4] 刘纯, 马烁, 董存, 等. 欧洲3·20日食对含大规模光伏发电的电网运行影响及启示[ J ]. 电网技术, 2015, 39(7): 1765-1772.  
LIU Chun, MA Shuo, DONG Cun, et al. Review and experiences of the European solar eclipse's impact on power grid operation with significant PV generation[ J ]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1765-1772.
- [5] 李常刚, 陈浩然, 齐航, 等. 一种面向日食事件的光伏电站出力预测方法及系统: CN202410153762.9[ P ]. 2024-05-10.
- [6] 秦放, 董存, 崔方, 等. 一种日食期间光伏电站出力爬坡率预测方法及装置: CN114117712A[ P ]. 2022-03-01.
- [7] LIBRA M, KOUŘÍM P, POULEK V. Behavior of photovoltaic system during solar eclipse in Prague [ J ]. International Journal of Photoenergy, 2016, 2016: 2653560.
- [8] MÁŠLO K. Impact of photovoltaics on frequency stability of power system during solar eclipse [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 31(5): 3648-3655.
- [9] 韩学山, 王心仪, 杨明, 等. 新能源爬坡事件综述及展望[ J ]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(5): 53-62.  
HAN Xueshan, WANG Xinyi, YANG Ming, et al. Review and prospect of renewable energy ramp events[ J ]. Journal of Shandong University ( Engineering Science ), 2021, 51(5): 53-62.
- [10] KILLINGER S, KREIFELS N, BURGER B, et al. Impact of the solar eclipse from 20th March 2015 on the German electrical supply: simulation and analysis[ J ]. Energy Technology, 2016, 4(2): 288-297.
- [11] 周滢垠, 廖宇. 2015年3月20日日食对德国电网的影响[ J ]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 15-18.  
ZHOU Yingya, LIAO Yu. Influence of solar eclipse on March 20, 2015 on German power grid[ J ]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 15-18.
- [12] 梁志峰, 秦放, 崔方. “6·21”日环食对光伏发电及电网运行影响分析[ J ]. 电力系统自动化, 2021, 45(7): 1-7.  
LIANG Zhifeng, QIN Fang, CUI Fang. Impact analysis of annular solar eclipse on June 21, 2020 in China on photovoltaic power generation and power grid operation[ J ]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(7): 1-7.
- [13] Regional Group Continental Europe and Synchronous Area Great. Solar eclipse 2015[ R ]. [ S.l.: s.n. ], 2015: 16-18.
- [14] KURINEC S K, KUCER M, SCHLEIN B. Monitoring a photovoltaic system during the partial solar eclipse of August 2017[ J ]. EPJ Photovoltaics, 2018, 9: 7.
- [15] 李西明. 异常天气对光伏并网系统出力的影响[ D ]. 北京: 华北电力大学, 2017: 20-21.  
LI Ximing. Impact of abnormal weather on power output of photovoltaic system [ D ]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 20-21.
- [16] YILMAZ H, KOL S, POYRAZOGLU G. Insights for the next solar eclipse in Turkish grid with increased solar capacity [ C ]//2023 IEEE PES GTD International Conference and Exposition. New York, USA, IEEE: 194-198.
- [17] 张华彬, 杨明玉. 基于最小二乘支持向量机的光伏出力超短期预测[ J ]. 现代电力, 2015, 32(1): 70-75.  
ZHANG Huabin, YANG Mingyu. Ultra-short-term forecasting for photovoltaic power output based on least square support vector machine [ J ]. Modern Electric Power, 2015, 32(1): 70-75.
- [18] 王春龙, 杨霁蓉, 李金平, 等. 多因素耦合对光伏组件表面温度影响的试验研究[ J ]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 112-118.  
WANG Chunlong, YANG Airong, LI Jinping, et al. Experimental study on effect of multi-factor coupling on surface temperature of photovoltaic module [ J ]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2019, 40(1): 112-118.
- [19] LIN D Y, LI X S, DING S Y, et al. Strategy comparison of power ramp rate control for photovoltaic systems [ J ]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 329-341.
- [20] RIQUELME-DOMINGUEZ J M, GONZALEZ-LONGATTI F M, MARTINEZ S. Decoupled photovoltaic power ramp-rate calculation method for perturb and observe algorithms [ J ]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(4): 932-940.
- [21] 张东英, 代悦, 张旭, 等. 风电爬坡事件研究综述及展望[ J ]. 电网技术, 2018, 42(6): 1783-1792.  
ZHANG Dongying, DAI Yue, ZHANG Xu, et al. Review and prospect of research on wind power ramp events [ J ]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1783-1792.
- [22] 梁志祥, 刘晓明, 牟颖, 等. 基于深度学习的新能源爬坡事件预测方法[ J ]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(5): 24-28.  
LIANG Zhixiang, LIU Xiaoming, MU Ying, et al. Prediction method of wind power and PV ramp event based on deep learning [ J ]. Journal of Shandong University ( Engineering Science ), 2019, 49(5): 24-28.
- [23] 环球信息网. 中国日食时间表[ EB/OL ]. (2021-05-07) [ 2025-05-05 ]. <https://www.gpbctv.com/edu/202105/185720.html>
- [24] 中国气象数据网. 中国地面气象站基本气象要素观测数据[ EB/OL ]. (2024-07-17) [ 2025-05-05 ]. <https://www.nmic.cn/site/theme.html>