

凌俐嘉,王婷,赵艳杰. 基于 MATLAB 方法的太阳辐照度波动特征分析——以乌干达布库津杜太阳能热电混合电站为例[J]. 气象研究与应用,2022,43(4):98–103.

Ling Lijia, Wang Ting, Zhao Yanjie. Characterization of solar irradiance fluctuations based on MATLAB method——A case study of a hybrid solar thermal power plant in Bukuzindu, Uganda[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(4): 98–103.

基于 MATLAB 方法的太阳辐照度波动特征分析

——以乌干达布库津杜太阳能热电混合电站为例

凌俐嘉¹, 王 婷², 赵艳杰³

(1. 广西电力职业技术学院, 南宁 530299; 2. 上海华滋环境科技有限公司, 上海 201908;

3. 深圳民航凯亚有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 光伏功率的不稳定因素主要由太阳辐照度波动引起, 有必要对区域太阳辐照度波动特征进行分析研究, 可为太阳辐照度预测和发电计划的制定提供理论基础依据。通过利用乌干达布库津杜太阳能热电混合电站 2020 年 1 月、3 月、11—12 月的太阳辐照度监测数据, 基于 MATLAB 方法, 对该电站的太阳辐照度波动的频次、斜率和持续时间进行分析研究, 探明该地区太阳辐照度的变化特征。结果表明, 乌干达辐照度波动在旱季比雨季更频繁, 下午的波动频次高于上午; 非晴天高斜率波动事件多于晴天, 但晴天也可能出现高斜率波动事件; 乌干达大多数辐照度波动持续不到 5min。

关键词: MATLAB; 太阳辐照度; 波动; 中值滤波; 阈值

中图分类号: P422.1

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.4.16

近年来全球光伏市场强劲增长, 2019 年全年新增装机容量达到 97GW, 使全球总量达到约 300GW, 光伏发电已经成为新能源发电新的增长点^[1]。然而太阳辐照度是影响光伏电站发电量的主要因素, 其具有较高的波动性和随机性, 对大型光伏电站的并网安全稳定运行产生不良影响^[2]。

在非洲, 大部分国家的电力供应形势不容乐观, 尤其是撒哈拉以南非洲地区。约 6 亿人用不上电, 全区供电率远低于全球平均水平。非洲只有 6 个国家的家庭供电率高于 70%。农村地区基本无法获得稳定的电力, 甚至城市地区也无法获得 100% 的电力覆盖^[3-4]。由此可见, 非洲急需实现可持续、稳定的电力供给。大多数非洲国家为电力发展制定了目标, 即到 2030 年为所有人实现负担得起、可靠、可持续的电能, 同时还需满足全球环境保护要求, 所使用的电能必须是清洁环保的^[5-6]。因此, 寻找火电、水电等传统电能的替代品对非洲来说迫在眉睫。

风能、生物质能和地热能在非洲的可再生能源

发电中发挥着重要作用^[3,6], 太阳能目前仅占非洲总发电量的一小部分, 但却是非洲大陆最有前景的可再生能源。非洲拥有赤道以外最多的太阳能资源, 尤其是在北非。阿尔及利亚每年接收 $2800\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 的太阳辐射, 而摩洛哥每年接受的太阳辐射为 $2700\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, 这几乎是全球平均年太阳辐射量的两倍^[7-8], 这充分说明了非洲太阳能资源的丰富性。但非洲太阳能发电的发展似乎与其太阳能辐射的含量不匹配, 以光伏电站为例, 2017 年非洲的光伏装机容量仅为 3.63GW ^[9]。

如果要在非洲进一步扩大太阳能发电场的规模, 就需要更强有力的激励措施和更好的技术。在政策方面, 可以考虑在大多数国家成功实施的上网电价。该政策已被证明可以刺激太阳能发电厂的发展^[9]。在技术方面, 混合式太阳能发电站是新技术的主流, 包括太阳能和风能、生物质能混合或光伏和光热混合等^[10-11]。利兹大学与乌干达能源与节能研究中心(CREEC)、坦桑尼亚的达累斯萨拉姆理工学

收稿日期: 2022-06-24

作者简介: 凌俐嘉(1996—), 硕士, 助教, 主要从事新能源与环境科学教学与研究。E-mail: linglijia0310@163.com

院(DIT)、刚果的马里安恩古瓦比大学正在开展太阳能和生物质能混合发电的项目——布库津杜太阳能热电混合电站。该项目的实施无疑将进一步提高非洲光伏发电的装机容量,在提供电能的同时不会对环境造成破坏。但太阳辐射是每时每刻变化的,并且其变化的随机性和波动性很强,这可能会对发电设备或系统造成负面影响,比如降低发电厂的电量、导致电压波动或系统崩溃等;对于光伏设备来说,可能会影响其生命周期、工作温度和性能等^[12-15]。因此,本文以整个乌干达项目为基础,利用 MATLAB 对辐照度波动的频次、斜率和持续时间进行分析。通过对这些特性的分析,为后续太阳辐照的预测和电站发电计划的制定奠定基础。

1 资料和方法

1.1 资料来源

研究资料来源于乌干达布库津杜太阳能热电混合电站 2020 年的太阳能辐照度数据,所有数据均由辐照度传感器测量而得,为确保数据的准确性,辐照度传感器内部有三个测量通道,即每一刻的辐照度会有三个记录数据。

由于数据量大,难以分析全年太阳辐照度数据,根据当地的气候特性,把乌干达一年分为旱季和雨季,因此仅选取乌干达旱季和雨季 4 个月的数据(旱季和雨季各取两个月,一月和十二月为旱季代表,三月和十一月为雨季代表),并从每个月的数据中选取 14d 的数据进行分析。大部分数据的初始记录时间是随机的,即大部分辐照度数据的初始记录时间不是日出点或特定时间点。

1.2 数据处理

(1)中值滤波:采用中值滤波去除尖峰。原始数据中存在一些错误数据,也就是“尖峰”。中值滤波是一种非线性信号处理技术,其原理是将数字序列中某个点的值替换为该点附近每个点的中值,从而消除噪声点,也就是有效地去除了原始数据中的峰值(图 1),该方法的优点是算法简单易实现^[16]。

(2)数据校正:对原始数据的 x 轴和 y 轴单位进行校正。原始数据中的 x 轴代表测量次数,应校准为有意义的时间线,即转换为秒。假设数据的采样率为 10Hz,即可以通过将原始数据的 x 轴乘以 0.1 来完成到秒的转换。同样,x 轴可以转换为分钟、小时或天。

辐照度传感器的数值记录是以电压的形式呈现

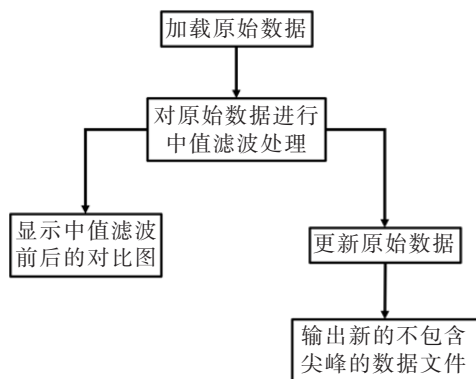


图 1 尖峰去除程序工作原理

的,即 y 轴表示的是原始数据中的电压,单位是 V,应该换算成辐照度,单位是 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。y 轴的校准系数设定为 1.5。

(3)确定计算的开始时间:数据校准后,可计算辐照度波动的频次、斜率和持续时间。第一步是找到完整第一天的开始时间。以从平坦点上升的第一个波形为第一天,通过观察数据,“平”的值定义为 $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这样可以避免将最初的不完整辐照度数据视为第一天。然后在此基础上截取 14d 的数据。一个波形的起点定义为日出点,终点定义为日落点,求一天的波动频次,即求一天内发生了多少次波动。

1.3 研究方法

1.3.1 MATLAB

MATLAB 是一款数学软件,主要应用领域包括数字图像处理、数字信号处理、工程与科学测绘、通信系统与控制系统设计与仿真、金融与金融工程。它是数据矩阵的基本单位,其指令表达式与数学和工程中常用的公式类似,可以进行数值分析、矩阵计算、科学数据可视化和非线性动态系统的建模与仿真等诸多方面,因此 MATLAB 比其他同类软件操作简单方便^[17-18]。本研究使用它对原始数据进行处理、定义波动并对波动的频次、斜率、持续时间进行统计、计算和汇总。

1.3.2 波动的定义

本研究侧重于大幅下降的辐照度波动,如图 2 所示。采用阈值法检测波动。将辐照度数据的最大值和最小值相加,然后除以 2 得到平均值,画出阈值参考线,并记录参考线与辐照度数据的交点。若某处的阈值小于上一时刻的阈值,并大于下一时刻的阈值,则该处发生了辐照度波动,如图 2 中的蓝点所示。

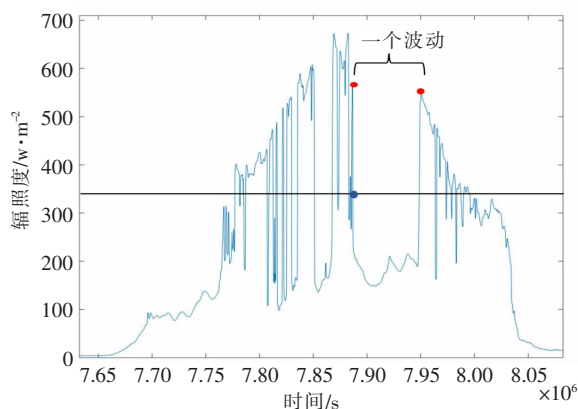


图2 波动的定义和阈值的示意图

1.3.3 波动的频次、斜率与持续时间

一个波形的起点和终点分别定义为日出和日落点,这样就可以找到正午的位置,然后统计上午和下午波动的频次。

不同文献中对斜率的定义不同。在本文中,斜率定义为波动的初始点和波谷之间的差除以时间段的长度,此时斜率是负的;或者波动的波谷和终点之间的差除以时间段的长度,此时斜率是正的。式(1)和式(2)分别是辐照度下降和上升的计算公式。

$$Ramp\ rate = \frac{\Delta G}{\Delta t} = \frac{G_{low} - G_{start}}{\Delta t} \quad (1)$$

$$Ramp\ rate = \frac{\Delta G}{\Delta t} = \frac{G_{end} - G_{low}}{\Delta t} \quad (2)$$

在程序中,根据辐照度数据与阈值线的交点检测辐照度波动的下降时间,求出波动的起点、波谷、终点及其对应的时间,然后斜率的计算结果可以通过式(1)和式(2)得到。同样,可以从波动的起点和终点及其对应的时间之后获得波动的持续时间。经过上述计算,所有的斜率、波动持续时间和波动的起止时间被放入三个不同的一维序列中。波动频次、斜率与持续时间计算原理见图3。

2 结果与分析

2.1 太阳辐照度波动频次

2.1.1 旱季太阳辐照度波动频次

图4显示了1月份的辐照度波动频次。三个通道的总波动分别为424、410和424,日均波动分别为30、29和30。上午波动频次为193、172、190,下午波动频次为231、238、234。1月份总波动频次可高达424,日均波动约为30。早间波动的数量高达193,但低于下午的最小值231。

对12月辐照度波动频次进行分析。12月三个

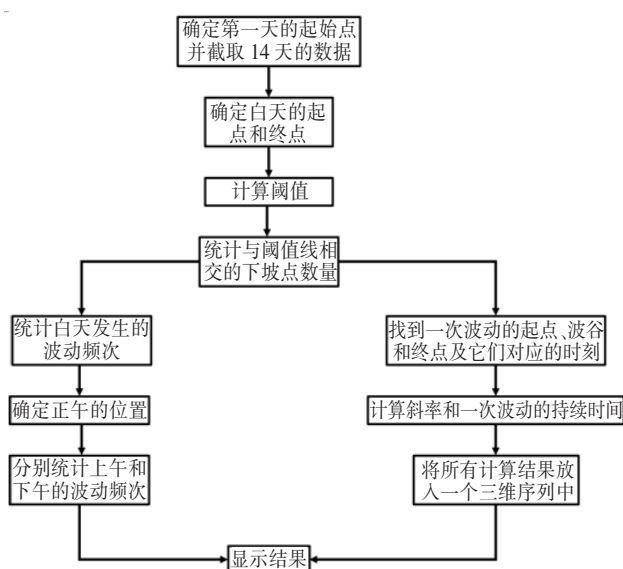
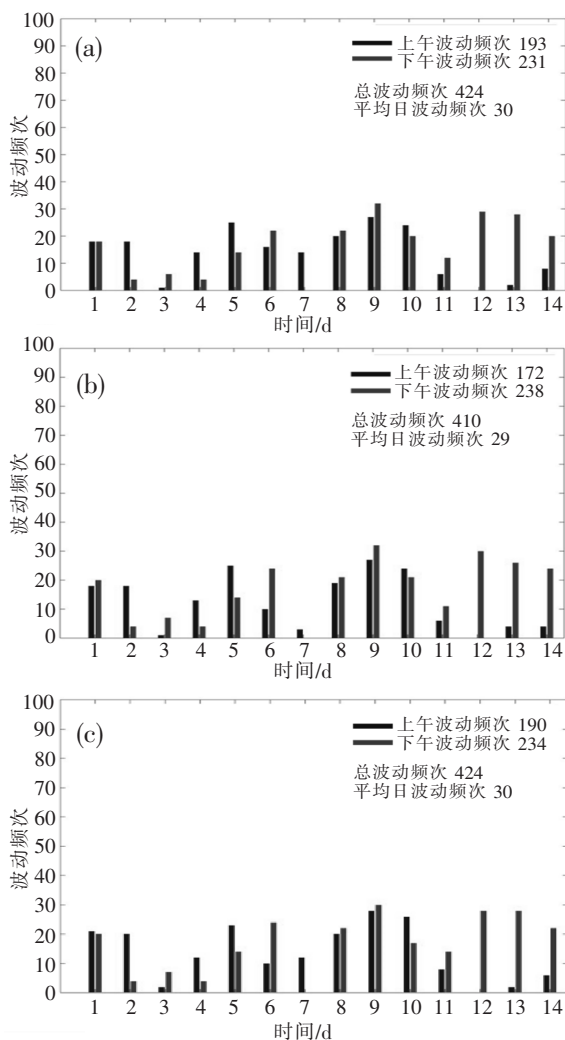


图3 数据分析工作原理图

图4 1月波动频次统计图
(a)通道1;(b)通道2;(c)通道3

通道记录的波动总数分别为 330、327 和 321, 日均波动频次分别为 23、23 和 22。上午波动频次为 150、160、156, 下午波动频次为 180、167、165。330 是 12 月总波动频次的最大值, 日均波动应该在 23 左右。这个月, 上午和下午的波动频次相差比较小, 上午最大和下午最小的相差只有 5 次。

2.1.2 雨季太阳辐照度波动频次

对于雨季, 选取 3 月和 11 月的辐照度数据进行分析。3 月辐照度波动总频次为 358、339、363, 日均波动频次分别为 25、24 和 25。上午波动范围在 114 到 123 左右, 下午波动都在 200 以上, 最大 240。

11 月总波动频次分别为 416、289、427, 日均波动频次分别为 29、27、30。早上有 228 到 238 次波动。下午波动频次均低于上午, 分别为 179 次、161 次和 189。

2.1.3 不同季节太阳辐照度波动频次对比分析

对于每一项数据(总波动、日均波动、上午波动和下午波动)仅取其平均值。1 月以 419 次总波动位居第一, 11 月以微弱优势紧随其后, 3 月和 12 月分别以 353 和 326 次波动位居第三和第四。平均每日波动与总波动排名相同。可以看出, 旱季的波动比雨季的波动略大。这可能是由于大气中气溶胶的影响。气溶胶吸收太阳辐照度, 减少一些到达地球表面的太阳辐照度。也就是说, 虽然一月太阳充足, 但到达地球表面的辐照量并不多, 从而引起辐照度的波动。气溶胶会影响太阳辐照度, 是太阳辐照度散射和扩散的原因之一。旱季气溶胶比雨季多, 因此它们吸收更多的太阳辐照度, 从而导致更多的辐照度波动。理论上, 12 月的辐照度波动应该比雨季略高。这可能是由于原始数据质量问题。3 月和 11 月, 辐照度波动频次与 1 月相比呈下降趋势。这是因为雨水冲走

了空气中的气溶胶颗粒和其他污染物, 使它们不如旱季丰富, 因此波动较小。11 月的降雨量比 3 月少, 大气中的气溶胶可能更多, 因此辐照度的波动也比 3 月更大。

对上午和下午的波动频次进行对比后可以得知(图略), 只有 11 月的结果与其他三个月的结果不同, 上午的波动频次高于下午。1 月、3 月和 12 月都显示出相同的结果, 下午波动多于上午波动。这也符合乌干达的气候, 早上较凉爽、下午较热。旱季和雨季虽然降雨量、空气湿度等存在差异, 但温差上的差异并不显著, 也就是说旱季和雨季下午的气温都比上午高。因此, 比较上午和下午的波动频次差异可以发现, 除了季节差异外, 时间和温度也被认为是影响辐照度波动的因素。

2.2 辐照度波动的斜率

参考 PV GIS 给出的乌干达晴空条件下太阳辐照度的变化, 在没有任何云层的情况下, 太阳辐照度从日出开始上升, 并在正午达到峰值, 然后稳步下降到日落。也就是说, 若太阳辐照数据的波形与正弦波的正向部分基本一致, 即可判断该数据为晴天情况下的太阳辐照数据。反之, 若太阳辐照数据的波形与正弦波的正向部分相差较大, 如峰值不发生在正午时分, 或在白天呈现较大的负值波动, 则可以判断该数据为阴雨天情况下的太阳辐照数据。

对晴天和阴雨天的太阳辐照数据进行斜率分析计算, 结果如图 5 和图 6 所示。结合材料和方法中提到的斜率方程可以知道, 斜率是太阳辐照度在一定时间内瞬时变化的差值。y 轴表示斜率($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), x 轴表示斜率发生的时间。若斜率为负值且数值越大, 代表太阳辐照度的值在一瞬间下降得越多。在电力系统和电力设备中, 主要危害是此类负值高斜率

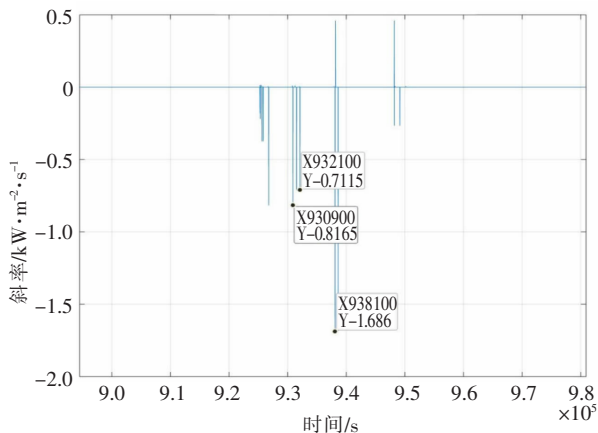


图5 晴朗天气的斜率

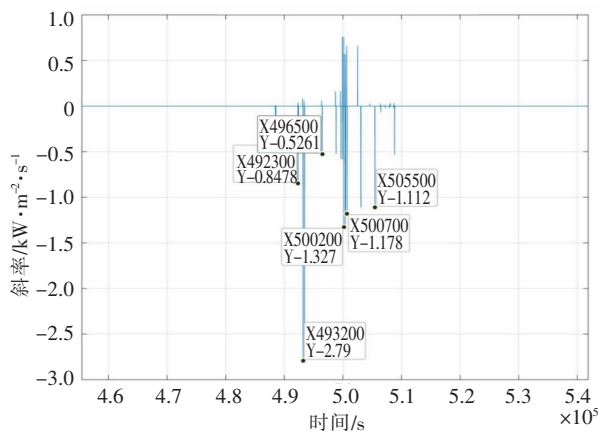


图6 非晴朗天气的斜率

事件。因此,仅对数值较大的点进行标记和讨论,而数值较小的点则不在讨论范围内(例如,从 $-0.1\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 到 $-0.4\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的斜率)。

对晴朗天气的太阳辐照数据进行斜率计算,结果如图5所示。可以发现高斜率出现,分别为 $-0.71\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $-0.8165\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $-1.686\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,这种高斜率事件出现约6次。通过观察图6,即非晴天的斜率,可以发现大约有8个高斜率事件,其发生的次数多于晴天。此外,从数值上看,非晴天的平均斜率高于晴天。

通过对斜率的观察和分析可知,晴天和非晴天斜率是不同的,因此推测云是影响斜率的主要因素。即使在晴天,云层不会多次遮挡太阳的情况下,也有可能发生高斜率事件。而在非晴天(多云或下雨),太阳比晴天时被遮挡的更多,因此高斜率事件的数量多于晴天,斜率最大负值高于晴天,可达数万瓦每秒。这种负值高斜率事件对光伏设备和光伏电网都是有害的。

2.3 辐照度波动的持续时间

对乌干达旱季和雨季的辐照度波动持续时间进行分析得知(图略),在旱季,3min内的波动发生次数最多,其次是2min内的波动,1min和4min内的辐照度波动位列第三和第四位。持续时间较长的波动与短期波动相比数量较少,不超过15次。在雨季,大多数波动持续不到两分钟,而持续三分钟的波动比旱季少。与旱季一样,存在一些持续时间较长的波动,但这些持续时间较长波动的数量也很少。

结合分析结果,很难确定影响波动持续时间的因素为季节。如果将小于5min的辐照度波动定义为短期波动,那么乌干达的短期波动比长期波动发生的更频繁,此结论对旱季和雨季都适用。一般来说,波动的持续时间可能是几秒钟至几小时不等,其影响因素包括风速、云、光伏系统的大小和面积等^[8]。本项目未囊括乌干达的风速和云的信息,该领域的研究也很少,因此无法做出合理的假设和分析为什么乌干达的辐照度波动都是短期的波动。

3 结论

本项目通过MATLAB的中值滤波法和阈值法对太阳辐照波动的频次、斜率和波动时间进行分析并得出以下结论:

影响太阳辐照度波动的因素包括季节、时间、温度和云量。在乌干达,由于气溶胶的影响,旱季的辐

照度波动频次高于雨季。受温度的影响,下午的辐照度波动频次比上午多。由于云的影响,非晴天会发生更多的负值高斜率事件且数值更大。乌干达的辐照度波动多为短时波动,即小于5min的波动,而长时间波动出现的次数较少。其他研究中关于波动持续时间的分析大多数是基于模拟辐照度数据而不是特定位置的辐照度数据,此外乌干达的风速和云量信息不全,因此无法进行比较。

因没有相关数据,本文没能开展乌干达辐照度波动的影响因素的分析,另外,有必要开展不同气候区辐照度波动的对比研究,将进一步丰富太阳能开发利用领域的研究成果。

参考文献:

- [1] 王青,江华,李嘉彤,等.中国及全球光伏产业发展形势分析[J].太阳能,2022(11):5-10.
- [2] 高忠旭,李仕杰,范俊杰.分布式光伏电源对配电网电压的影响与改善[J].科技与创新,2017(9):57.
- [3] IRENA I. Prospects for the African power sector [D]. International Renewable Energy Agency: Scenarios and strategies for Africa project, 2011.
- [4] 王爽.南非国家电力市场投资研究[J].国际工程与劳务,2022(11):55-58.
- [5] Miketa A. Africa 2030: Roadmap for a renewable energy future[D]. Abu Dhabi, 2015.
- [6] 邹松.非洲发展可再生能源潜力巨大[N].人民日报,2022-06-14(017).
- [7] Quansah D A, Adaramola M S and Mensah L D. Solar photovoltaics in sub-Saharan Africa—addressing barriers, unlocking potential[J]. 2016.
- [8] 李志明,曹峻楷.分布式光伏提水系统在非洲农村的应用分析[J].国际工程与劳务,2022(8):84-86.
- [9] Lei Y, Lu X, Shi M, et al. SWOT analysis for the development of photovoltaic solar power in Africa in comparison with China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2019(77): 122-127.
- [10] Adaramola M S, Paul S S and Oyewola O M. Assessment of decentralized hybrid PV solar—diesel power system for applications in Northern part of Nigeria [J]. Energy for Sustainable Development, 2014(19): 72-82.
- [11] Mandelli S, Barbieri J, Mereu R, et al. Off-grid systems for rural electrification in developing countries: Definitions, classification and a comprehensive literature review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016(58): 1621-1646.
- [12] 温鑫,姚文莹,何圣川,等.分布式光伏接入对系统电能

- 质量的影响分析与应对措施[J]. 机电信息, 2022(23): 22–24.
- [13] 钟俊琛. 新能源并网对电能质量的影响及改进对策分析[J]. 光源与照明, 2022(6): 220–222.
- [14] 吴鹏. 新能源并网对电力系统电能质量的影响[J]. 光源与照明, 2022(3): 246–248.
- [15] 黄瑶玲, 杨楠, 刘浔, 等. 分布式光伏电源接入对配电网影响[J]. 电工材料, 2022(1): 78–80.
- [16] Tan L and Jiang J. Digital signal processing: fundamentals and applications[D]. Academic Press, 2018.
- [17] 袁云梅, 李晶, 多化琼. MATLAB 在电路分析基础中的应用研究[J]. 自动化应用, 2022(7): 166–168.
- [18] 杨隽铠, 胡秉谊. MATLAB 在电路分析与计算中的应用[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(11): 114–117.
- [19] Omran W A, Kazerani M, and Salama M. A study of the impacts of power fluctuations generated from large PV systems[J]. In: 2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE); IEEE, 2009: 1–6.

Characterization of solar irradiance fluctuations based on MATLAB method

——A case study of a hybrid solar thermal power plant in Bukuzindu, Uganda

Ling Lijia¹, Wang Ting², Zhao Yanjie³

(1. Guangxi Electrical Polytechnic Institute, Nanning 530299, China;

2. Shanghai Huazhi Environmental Technology Limited Company, Shanghai 201908, China;

3. Shenzhen Civil Aviation Kaiya Limited Company, Guangdong Shenzhen 518057, China)

Abstract: The instability factor of photovoltaic power is mainly caused by solar irradiance fluctuation. It is necessary to analyze and study the characteristics of regional solar irradiance fluctuation, which can provide the theoretical basis for solar irradiance prediction and power generation plan formulation. By using the solar irradiance monitoring data of the solar hybrid power Station in Bukuzindu, Uganda in January, March, and November–December 2020, the frequency, slope, and duration of solar irradiance fluctuations of the station were analyzed and studied based on the MATLAB method, and the variation characteristics of solar irradiance in this region were explored. The results showed that the frequency of irradiance fluctuations in the dry season was higher than that in the rainy season, and the fluctuation frequency was higher in the afternoon than in the morning. There were more high-slope fluctuation events on non-sunny days than on sunny days, but high-slope fluctuation events were likely to occur on sunny days. Most irradiance fluctuations in Uganda lasted less than 5 minutes.

Key words: MATLAB; solar irradiance; fluctuation; median filtering; threshold value