

# PV Power Analysis Based on Light Intensity Curve and Differential and Integral Calculus

Tianliang Yao, Xingquan Wu

CEEC Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou Gansu  
Email: yaotianliang@163.com

Received: May 12<sup>th</sup>, 2018; accepted: May 28<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Base on the regional representative of the weather station for many years of light observation data, this paper presented a method for analyzing output characteristics of large scale photovoltaic power generation base and calculation method of power generation. First, this paper obtained the typical daylight intensity curve by fitting the METEOINFO optical resource analysis software, secondly, used differential theory to calculate the output characteristic curve based on the typical daylight intensity curve, at last, calculated power generation by using integral method. The conclusion can be used to predict the generated output of large photovoltaic power generation base, operation and peaking demand calculation, to solve predictive issues of large-scale photovoltaic power generation base.

## Keywords

Large-Scale Photovoltaic Power Generation Base, Typical Daylight Intensity Curve, Calculus Method, Output Characteristics, Power Generation

---

# 基于光照强度曲线微积分的光伏发电特性分析

姚天亮, 吴兴全

中国能建甘肃院, 甘肃 兰州  
Email: yaotianliang@163.com

收稿日期: 2018年5月12日; 录用日期: 2018年5月28日; 发布日期: 2018年6月6日

---

## 摘要

基于区域代表气象站多年光照资源的观测数据, 提出一种大型光伏基地发电出力特性分析方法和发电量

计算方法。首先, 通过METEONFO光资源分析软件拟合得到一年中十二个月份典型日光照强度逐时曲线, 然后采用曲线微分理论求取各月份典型日逐时发电出力特性曲线, 最后运用曲线积分方法计算典型日发电量, 进而得到各月份典型日发电量、全年累计发电量及年等效利用小时数。分析结论可以应用于发电功率预测和调度运行, 解决大型光伏发电基地在电网调度中的预知性问题, 以甘肃某大型光伏基地为例介绍了该方法的实施应用过程。

## 关键词

大型光伏基地, 光照强度曲线, 微积分, 发电出力特性, 发电量

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

截至 2016 年底, 我国光伏累计装机容量达到 7740 GW, 以地面集中式光伏电站为主。2016 年第一批光伏领跑者计划八大基地总容量 5.5 GW, 2017 年光伏发电先进技术应用基地计划建设 8~10 GW, 建设 0.5 GW 及以上大型光伏发电基地仍然是发展趋势。

光伏发电出力特性随机性和波动性强, 属于不稳定和冲击性电源, 且随着光伏发电基地装机容量的增加, 其不利特性将给电力系统电源规划、电网运行方式安排带来巨大影响。虽然光伏电站都安装有光伏功率预测[1][2]系统, 但是针对光伏电站群整体发电出力特性[3]的研究特别缺乏。

目前, 光伏功率预测主要原理分为光功率转换方法和历史数据分析方法[4]。前者天气预报模型复杂, 光电转换效率直接采用实验室数据, 忽略了外部环境对效率的影响, 预测值精度不高, 结果偏理论化, 且仅能实现 0~72 h 短期和 15 min 超短期功率预测[5], 不能提供长期功率预测[6]。后者需要一系列完整的历史数据库, 并引入复杂的人工智能算法。

因此, 研究一种简单实用的大型光伏发电基地发电出力特性预知性分析方法显得尤为重要。本文提出一种基于典型日光照强度曲线, 运用曲线微积方法求取发电出力特性曲线和发电量的方法, 很容易得到精确的长期发电出力特性曲线, 解决了目前大型光伏发电基地在电网调度中的预知性问题, 预测结果可作为新能源规划设计依据, 提高电力消纳能力分析的准确性, 还能为调度、安排调度曲线和调峰容量提供依据。

## 2. 出力特性传统预测方法

年总辐射量和年日照时数是表征太阳能资源主要指标。太阳能辐射量也称为光功率, 单位  $\text{MJ}/\text{m}^2$  或  $\text{kWh}/\text{m}^2$ , 太阳光照强度反映光照强弱, 单位  $\text{W}/\text{m}^2$ 。日照时数不等于日照时间, 是指达到一定光照强度的有效小时数, 可分为年日照时数、月平均日照时数、峰值日照时数等, 单位 h。

### 2.1. 太阳辐射强度预测

太阳光照强度[7]预测方式也可分为直接预测和间接预测两大类。前者根据代表气象站多年历史辐射量数据, 得到典型日辐射强度值, 未考虑天气变化的影响, 也无法反映太阳辐射强度的实时变化。后者包括基于数值天气预报和基于云图的实时预测方法。两者预测结果的空间分辨率都不理想, 适用于大区域光伏发电功率的预测。相比较而言, 后者预测精度好于前者, 但实时气象卫星云图的获取手段及分析

工作难度大。

## 2.2. 发电功率预测

光伏发电功率[8] [9] [10] [11]预测方式可分为直接预测和间接预测两大类。前者预测依据为光伏电站历史出力特性, 对预测算法的精确性和历史数据的完整性要求高。后者先预测太阳辐射强度, 再利用光功率乘以光电能量转换效率预测光伏发电功率, 该方法简单实用, 常用于光伏系统设计。

光电能量转换效率是电池组件将太阳光能转化为电能的效率。光伏组件的峰值功率也是在标准测试条件(STC: 1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, 环境温度 25°C)下标定, 组件峰值功率和的计算公式:

$$PMPP = POPT \times \eta = VOC \times ISC \times FF \quad (1)$$

式中:  $POPT$  为光功率,  $PMPP$  为光功率,  $\eta$  为光电转换效率,  $PMPP$  为电池组件峰值功率,  $VOC$  为开路电压,  $ISC$  为短路电流,  $FF$  为填充因子, 电池的结构品质、环境温度等外部环境因素影响光伏组件的效率。

## 2.3. 发电量预测

峰值日照时数是将太阳能辐射量折算成 1000 W/m<sup>2</sup> 条件下的小时数。若太阳能电池组件 1 h 接收到的太阳辐射量为 1 MJ/m<sup>2</sup>, 则由换算公式(2), 得出等效峰值日照时数为 1/3.6 h。

$$1 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h} = 106 \text{ J/m}^2 \cdot 3600 \text{ s} = 103 \text{ W/m}^2 / 3.6 \quad (2)$$

运用等效峰值日照时数乘以光伏装机容量得到光伏理论发电量。光伏电站工程设计中普遍采用上述方法推算光伏电站月平均发电量。该方法虽然提供了便捷的光伏发电量计算方法, 但忽略了光伏电站所处外部环境对发电功率的影响, 降低了发电量和峰值日照时数的预测精确度。

## 3. 发电出力特性曲线分析方法

### 3.1. 光照强度曲线

METEOINFO 软件是由中国气象工作者在 Microsoft 的 Net 环境中用 C 语言研发的一款气象绘图软件, 具有较强的综合数据图形显示、分析能力, 支持多种常用气象数据格式, 具备 GIS 功能。

利用气象站多年光照资源观测数据, 推算光伏基地代表年逐月典型日逐时光照资源参数。针对 12 个月份, 通过 METEOINFO 光资源分析软件模拟得到 12 条典型日光照强度逐时曲线。

以某大型光伏基地为例, 运用 METEOINFO 等光资源分析软件模拟得到 12 条典型日光照强度逐时曲线如图 1 所示。

### 3.2. 发电出力特性

定义分析发电出力特性指标包括: 发电出力特性曲线、最大出力系数、发电量、利用小时数、平均出力、光伏接纳能力, 用于评价光伏发电出力特性。

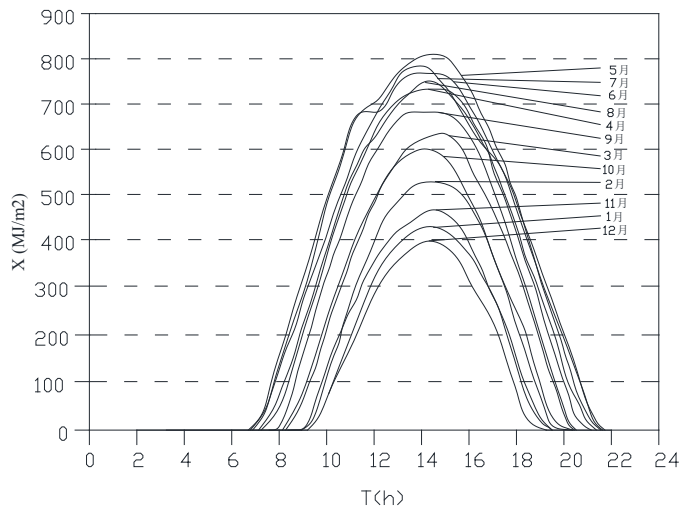
#### 1) 发电出力特性曲线

光伏发电出力计算公式:

$$P = \frac{dX}{3.6 \times dt} S \eta \quad (3)$$

式中:  $X$  为典型日逐时光照强度,  $S$  为光伏阵列面积,  $P$  为典型日逐时发电出力,  $\eta$  为光电效率,  $t$  为光照时间; 当  $dt$  无限趋近于 0 时, 得到发电出力  $P$  实时平滑的特性曲线。

由公式(3), 对各月份典型日光照强度逐时拟合曲线进行微分计算, 得到 12 条典型日逐时发电出力特性曲线, 即为光伏基地各月份典型日逐时发电出力特性曲线, 如图 2 所示。



**Figure 1.** Monthly typical light intensity curve  
**图 1.** 各月份典型日光照强度逐时拟合曲线

2) 最大出力系数

参见图 2, 各月份典型日逐时发电出力特性曲线纵坐标  $P$  的最大值  $P_{\max}$  与光伏基地装机容量  $S_N$  的比值, 得到光伏基地最大出力系数  $K_{PV}$ , 该系数为光伏基地重要的发电出力特性指标之一。

$$K_{PV} = \frac{P_{\max}}{S_N} \tag{4}$$

式中:  $P_{\max}$  为光伏基地发电出力的最大值,  $S_N$  为光伏基地装机容量。

3) 发电量

由公式(5), 首先某月份典型日逐时发电出力特性曲线对日有效发电时间  $t$  的积分, 得到该月份典型日发电量  $Q_{di}$ , 然后乘以各月份有效发电天数  $d_i$ , 得到各月份累计发电量  $Q_i$ , 进而通过求和得到全年累计发电量。

$$\begin{cases} Q_{di} = \int_{t_1}^{t_2} P_i dt \\ Q_i = Q_{di} d \\ Q_{total} = \sum_{i=1}^{12} Q_i \end{cases} \tag{5}$$

式中:  $Q_{di}$  为某月份典型日发电量,  $P_i$  为某月份典型日逐时发电出力特性曲线,  $t$  为日有效发电时间, 同理可求取一年中各月份典型日发电量;  $Q_i$  为各月份累计发电量,  $d$  各月份有效发电天数,  $Q_{total}$  为全年累计发电量。

4) 利用小时数

$$H = \frac{Q_{total}}{S_N} \tag{6}$$

式中:  $Q_{total}$  为全年累计发电量;  $S_N$  为光伏基地装机容量;  $H$  为等效年利用小时数。

利用式(6)求取全年累计发电量与光伏基地装机容量的比值, 得到光伏基地等效年利用小时数。

5) 平均出力

$$\begin{cases} P_{AV1} = \frac{Q_{di}}{T_1} \\ P_{AV2} = \frac{Q_{di}}{T_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $T_1$  为日出至日落时间;  $T_2$  为全天时间;  $Q_{di}$  为某月份典型日发电量。图 3 为该方法求得某光伏基地各月份典型日白天等效平均出力  $P_{AV1}$  和全天等效平均出力  $P_{AV2}$ 。

#### 6) 光伏接纳能力

$$S_{PV} = \frac{P_{PV}}{K_{PV}} \quad (8)$$

式(8)中:  $S_{PV}$  为电网可接纳光伏容量;  $P_{PV}$  为电网可为光伏提供调峰容量;  $K_{PV}$  为光伏基地最大出力系数。

基于光伏基地最大出力系数  $K_{PV}$  和电网可为光伏提供调峰容量  $P_{PV}$ , 利用式 3~6 可推算电网可接纳光伏容量  $S_{PV}$ ; 通过增加调峰电源容量提高电网可为光伏提供调峰容量  $P_{PV}$ , 可以提高电网接纳光伏的能力。

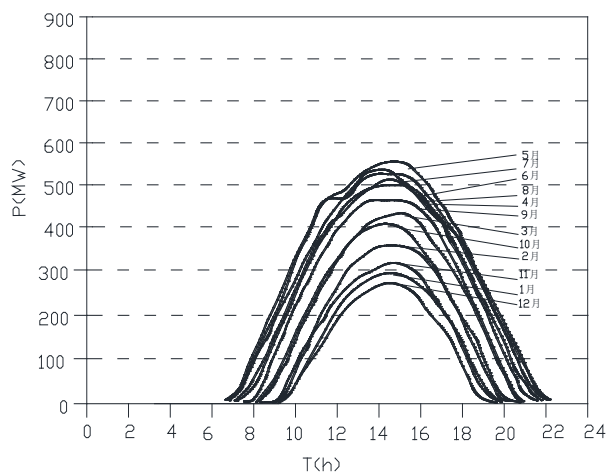


Figure 2. Monthly typical power generation characteristic curve  
图 2. 各月份典型日逐时发电出力特性曲线

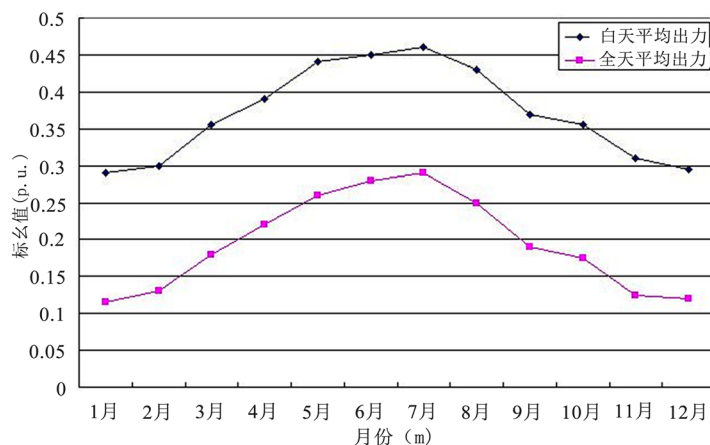


Figure 3. Monthly typical average power generation  
图 3. 各月份典型日平均发电出力

## 4. 应用实例

以某 1000 MW 光伏基地为例得到出力特性结论: 该光伏基地 5 月光照强度最大, 6 月和 7 月次之, 典型日光照强度曲线及出力特性曲线变化趋势基本一致; 光伏基地最大出力 823.3 MW, 超过 80% 出力的不足 0.5%; 典型日白天等效平均出力 460.4 MW 和全天等效平均出力 370.9 MW; 白天可发电有效时段内, 全年约 60% 的情况出力在 370 MW 以下; 30% 以下出力占到全年的约 50%; 光伏基地等效年利用小时数为 1692.4 h。实例表明, 本文提出大型光伏发电基地出力特性分析方法能够得到精确的出力特性曲线, 通过发电出力特性曲线与负荷特性曲线的叠加, 能够知道调度运行曲线安排及系统调峰容量配置。

## 5. 结论

1) 针对大型光伏发电基地, 提出一种基于光照强度曲线和微积分理论的发电出力特性曲线分析方法, 能够得到光伏基地各月典型日发电出力特性曲线、发电量、平均出力, 以及月发电量和年发电量的预知, 可作为电网安排经济调度运行曲线和电网调峰容量计划的依据, 提高电网接纳光伏容量的能力。

2) 所提方法可以应用于大型光伏基地中长期预测, 有助于从宏观上分析其出力特性。

## 参考文献

- [1] 张田. 光伏发电出力预测与并网分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [2] 陈世慧, 阮大兵. 光伏发电有功功率预测及其在电网频率控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013(20): 125-129.
- [3] 葛鹏江. 大规模集中接入的光伏电站功率预测[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [4] 李旭. 基于典型日出力特性分析的光伏电站功率预测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [5] 朱梅梅, 苏建辉, 陈智慧. 基于 EEMD 和 IPSO 的 SVM 短期光伏出力预测[J]. 电气工程学报, 2016, 11(4): 47-54.
- [6] 张曦, 康重庆, 张宁, 等. 太阳能光伏发电的中长期随机特性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 6-13.
- [7] 徐静, 黄南天, 王文婷, 等. 基于 GA-ELM 神经网络的逐时太阳辐照量预测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 105-109.
- [8] 卢静, 翟海清, 冯双磊, 等. 光伏发电功率预测方法的探索[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 380-384.
- [9] 李安寿, 陈琦, 王子才, 等. 光伏发电系统功率预测方法综述[J]. 电气传动, 2016, 46(6): 93-96.
- [10] 钱振, 蔡世波, 顾宇庆, 等. 光伏发电功率预测方法研究综述[J]. 机电工程, 2015, 32(5): 651-659.
- [11] 熊云. 光伏出力预测方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2016.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [aepe@hanspub.org](mailto:aepe@hanspub.org)