

Relevance Analysis of Aksu Photovoltaic Power Station Based on Measured Data

Yong Qian, Ancheng Xue, Yecheng Li, Kewen Yang

LAPS, North China Electric Power University, Beijing

Email: Brave_Q@163.com

Received: Jan. 8th, 2019; accepted: Jan. 23rd, 2019; published: Jan. 30th, 2019

Abstract

Uncertainty, intermittence and fluctuation of photovoltaic power generation will cause photovoltaic power generation to abandon light, and mastering its characteristics is an important basis for improving absorption. In this paper, the correlation of photovoltaic power plants is analyzed based on measured data. Firstly, the calculation method of the correlation between the output of the same photovoltaic power station at different time periods and the output of the same photovoltaic power station at different time periods is given. Secondly, the influence of cloud factor and geographic location on the output correlation of photovoltaic power station is analyzed theoretically. Finally, taking Aksu photovoltaic power station in Xinjiang as an example, the influence of cloud factor and geographic location on the output correlation of the same photovoltaic power station and the output correlation of different photovoltaic power stations are illustrated by the measured data.

Keywords

Relevance, Photovoltaic Power Station, Measured Data, Cloud Cover Factor, Geographical Position

基于实测数据的阿克苏光伏电站相关性分析

钱 勇, 薛安成, 李业成, 杨可文

新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京

Email: Brave_Q@163.com

收稿日期: 2019年1月8日; 录用日期: 2019年1月23日; 发布日期: 2019年1月30日

摘 要

光伏发电的不确定性、间歇性和波动性特征, 会造成光伏发电弃光问题, 掌握其特性是提高消纳的重要

文章引用: 钱勇, 薛安成, 李业成, 杨可文. 基于实测数据的阿克苏光伏电站相关性分析[J]. 智能电网, 2019, 9(1): 1-10. DOI: 10.12677/sg.2019.91001

基础。本文基于实测数据分析光伏电站相关性。首先,给出了同一光伏电站不同时段出力的相关性和同一时段不同光伏电站出力的相关性计算方法;其次,从理论上分析云量因子和地理位置对于光伏电站出力相关性的影响;最后,以新疆阿克苏光伏电站为例,利用实测数据说明了云量因子和地理位置对同一光伏电站出力相关性的影响,以及不同光伏电站出力相关性的影响。

关键词

相关性,光伏电站,实测数据,云量因子,地理位置

Copyright © 2019 by author(s) 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

太阳能光伏发电作为一种清洁、可再生、蕴藏量巨大的新能源,继风电之后逐渐得到人们的青睐,中国新增装机容量连续5年全球第一。而光伏的不确定性、间歇性和波动性导致光伏输出功率不稳定,从而改变系统潮流分布,对系统调峰、调频具有显著影响,造成光伏消纳困难的问题。2017年新疆阿克苏弃光量3.339亿千瓦时,弃光率高达36.07%,主要原因是对于光伏特性认识不足,导致电网调度策略不合理。因此,分析光伏出力在不同场景、不同空间尺度下的相关性特征具有重要意义[1][2][3]。

目前研究光伏电站相关性主要集中在太阳辐射度、地理位置、晴空指数等方面。文献[4]提出以距离为尺度,计算不同位置的2个光伏电站间实测地表水平面总辐照度与晴空地表水平面总辐照度比值的相关性。文献[5]在已知每月逐时晴空指数均值的前提下,从气象学的角度给出了逐时晴空指数的概率密度函数。文献[6]利用晴空指数来描述光伏电站出力的不确定性。文献[7]对影响光伏出力不确定性因素的云量进行了建模。文献[8]从概率分布、波动特性等方面研究了光伏出力遮挡因子的随机特性,并分析了光伏出力的空间相关性。文献[9]对新能源发电的相关性进行了研究,提出应用经验分布函数描述风力与光伏出力的随机性。文献[10]阐述了风电的聚集效应及空间相关性对风电随机特性的影响。文献[11]给出了不考虑延时和考虑延时的风电功率相关系数计算方法,并在此基础上提出了风电功率的平均风速相关性分析方法。文献[12]研究了光伏电站群相关性分析,提出从单一光伏电站扩展至电站群,同向波动逐渐减小,光伏功率波动逐渐减弱。上述文献侧重于分析光伏电站输入与输出相关性,未着重分析光伏电站输出与输出之间的相关性。

本文基于实测数据分析光伏电站数据的相关性。首先,给出了同一光伏电站不同时段出力的相关性和同一时段不同光伏电站出力的相关性计算方法;其次,从理论上分析云量因子和地理位置对于光伏电站出力相关性的影响;最后,选取新疆阿克苏光伏电站数据说明了云量因子和地理位置对同一光伏电站和不同光伏电站出力相关性的影响。本文研究光伏出力的相关性,为电网调度提供认识光伏特性的基础,有利于减少弃光率。

2. 光伏电站出力相关性的计算方法

2.1. 同一光伏电站不同时段出力

同一光伏电站不同时段出力相关性,反应的是某光伏电站一段时间的出力与另一段时间的出力之间的关系。对于具有 L 天实测数据的某光伏电站,假设该光伏电站第 j 天在第 $1, 2, \dots, n$ 时刻的实测出力为:

$$P_j = [P_1^j, P_2^j, \dots, P_n^j]^T \quad (1)$$

式中, n 为光伏出力时长。

可获得反应同一光伏电站不同时段出力相关性的相关系数矩阵如下:

$$R_s = [\rho_s]_{L \times L} \quad (2)$$

$$\rho_s = r(P^\alpha, P^\beta) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^\alpha - \overline{P^\alpha})(P_i^\beta - \overline{P^\beta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i^\alpha - \overline{P^\alpha})^2 \sum_{i=1}^n (P_i^\beta - \overline{P^\beta})^2}} \quad (3)$$

式中, R_s 表示 L 天同一光伏电站不同时段出力的相关系数矩阵, ρ_s 表示第 α 天和第 β 天同一光伏电站不同时段出力的相关系数。

2.2. 同一时段不同光伏电站出力

同一时段不同光伏电站出力相关性, 反应的是同一时段不同光伏电站出力之间的关系。

对于具有 M 个光伏电站的大型光伏基地, 考虑延时 T , 则可获得考虑延时 T 的相关系数矩阵如下:

$$R_T = [\rho_T]_{M \times M} \quad (4)$$

$$\rho_T = r(P_T^f, P_T^g) = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{i+T}^f - \overline{P^f})(P_i^g - \overline{P^g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{i+T}^f - \overline{P^f})^2 \sum_{i=1}^n (P_i^g - \overline{P^g})^2}} \quad (5)$$

式中, R_T 表示同一时段 M 个光伏电站出力的延时为 T 的相关系数矩阵, ρ_T 表示同一时段第 f 号光伏电站和第 g 号光伏电站出力的延时为 T 的相关系数。

改变延时 T 的大小, 即可得到同一时段不同光伏电站出力在不同延时情况下的相关性, 从而更加准确的反映光伏电站出力之间的时空分布特性。

3. 光伏电站出力相关性的影响因素理论分析

光伏接收到的太阳辐射量的大小直接影响发电量, 太阳辐射量越大, 发电量越大。太阳辐射量大小与云量因子、地理位置有直接的关系。下文详细分析。

3.1. 云量因子

云量是指云遮蔽天空视野的成数, 在气象上常以天空中出现的云量的多少计算天气晴朗的程度, 云量因子表征云量对于光伏发电系统的输出功率影响程度, 序列表示为 $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{n-1}, \varepsilon_n]$ 。正常情况下, 晴天云量因子范围为 $0.9 \leq \varepsilon_i \leq 1$, 多云天云量因子范围为 $0.7 \leq \varepsilon_i < 0.9$, 阴天云量因子范围为 $\varepsilon_i < 0.7$ 。

云量因子表现为光伏输出功率限制和波动, 多云天和阴天的情况, 输出功率小于晴天, 波动频率大于晴天, 因此光伏出力序列表现为输出功率大小限制、波动, 以下分析云量因子对同一光伏电站不同时段出力相关性的影响。

假设光伏电站晴天的出力序列 x :

$$x = [0, \dots, 0, \gamma_1 x_1, \gamma_2 x_2, \gamma_3 x_3, \dots, \gamma_{n-2} x_{n-2}, \gamma_{n-1} x_{n-1}, \gamma_n x_n, 0, \dots, 0] \quad (6)$$

假设同一光伏电站多云天的出力序列 y :

$$y = [0, \dots, 0, \alpha_1 y_1, \alpha_2 y_2, \alpha_3 y_3, \dots, \alpha_{n-2} y_{n-2}, \alpha_{n-1} y_{n-1}, \alpha_n y_n, 0, \dots, 0] \quad (7)$$

假设同一光伏电站阴天的出力序列 y' :

$$y' = [0, \dots, 0, \beta_1 y'_1, \beta_2 y'_2, \beta_3 y'_3, \dots, \beta_{n-2} y'_{n-2}, \beta_{n-1} y'_{n-1}, \beta_n y'_n, 0, \dots, 0] \quad (8)$$

$$\rho(x, y) = \frac{(N-n)\bar{x} \cdot \bar{y} + \sum_{i=1}^n (\gamma_i x_i - \bar{x})(\alpha_i y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[(N-n)(0-\bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i x_i - \bar{x})^2 \right] \cdot \left[(N-n)(0-\bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (\alpha_i y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (9)$$

$$\rho(x, y') = \frac{(N-n)\bar{x} \cdot \bar{y}' + \sum_{i=1}^n (\gamma_i x_i - \bar{x})(\beta_i y'_i - \bar{y}')}{\sqrt{\left[(N-n)(0-\bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i x_i - \bar{x})^2 \right] \cdot \left[(N-n)(0-\bar{y}')^2 + \sum_{i=1}^n (\beta_i y'_i - \bar{y}')^2 \right]}} \quad (10)$$

式(9)(10)表明, 云量因子 α 、 β 、 γ 数值会影响 $\rho(x, y)$ 、 $\rho(x, y')$ 之间的大小关系。

3.2. 地理位置

地理位置(纬度相同, 经度不同)表现为同一出力时间, 光伏开始、停止发电时间不同, 光伏出力序列表现为开始、停止发电点向同一方向平移, 以下分析地理位置对同一时段不同光伏电站出力相关性的影响。

假设参考光伏电站 A 的出力序列 x :

$$x = [0, \dots, 0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-2}, x_{n-1}, x_n, 0, 0, \dots, 0] \quad (11)$$

假设同纬度不同经度、距离 A 光伏电站较近的光伏电站 B 的出力序列 y :

$$y = [0, \dots, 0, 0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n, 0, 0, \dots, 0] \quad (12)$$

假设同纬度不同经度、距离 A 光伏电站较远的光伏电站 C 的出力序列 y' :

$$y' = [0, \dots, 0, 0, 0, y'_1, \dots, y'_n, 0, 0, \dots, 0] \quad (13)$$

假设条件 1: 在 $i \leq \frac{n+1}{2}$, $0 < x_i < x_{i+1}$ 且 $x_i = x_{n-i+1}$

假设条件 2: $x_i = y_i = y'$

$$\rho(x, y) = \frac{(N-n-2)\bar{x} \cdot \bar{y} + (x_1 - \bar{x})(0 - \bar{y}) + (x_2 - \bar{x})(y_1 - \bar{y}) + \sum_{i=3}^n (x_i - \bar{x})(y_{i-1} - \bar{y}) + (0 - \bar{x})(y_n - \bar{y}) + (0 - \bar{x})(0 - \bar{y})}{\sqrt{\left[(N-n)(0-\bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \cdot \left[(N-n)(0-\bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (14)$$

$$\rho(x, y') = \frac{(N-n-2)\bar{x} \cdot \bar{y}' + (x_1 - \bar{x})(0 - \bar{y}') + (x_2 - \bar{x})(0 - \bar{y}') + \sum_{i=3}^n (x_i - \bar{x})(y'_{i-2} - \bar{y}') + (0 - \bar{x})(y_{n-1} - \bar{y}') + (0 - \bar{x})(y_n - \bar{y}')}{\sqrt{\left[(N-n)(0-\bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \cdot \left[(N-n)(0-\bar{y}')^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}')^2 \right]}} \quad (15)$$

根据假设条件 2, 可推导下式:

$$\Delta\rho = \rho(x, y) - \rho(x, y') = \frac{x_2 y_1 + (y_{n-1} - y_1) \bar{x}}{\sqrt{\left[(N-n)(0-\bar{x})^2 + \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \cdot \left[(N-n)(0-\bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (16)$$

根据假设条件 1, 式(16)表明, $\Delta\rho > 0$, 即 $\rho(x, y) > \rho(x, y')$ 。因此, 开始、停止出力时间越接近的光伏电站, 相关系数越大, 进而说明在同一纬度上, 地理位置越接近的光伏电站, 出力相关性越强。

4. 实测数据光伏电站出力相关性分析

选取的光伏电站位于新疆阿克苏地区, 太阳能资源丰富, 年平均总辐射辐照度约 160~200 W/m², 具体光伏电站信息如表 1 所示。光伏电站实测数据均来自于 D5000 自动采集数据系统, 获取时间为 2015 年 1 月至 12 月, 1 分钟采集 1 次光伏出力值, 1 天共采集 1440 个数据值。

Table 1. Basic information of photovoltaic power station

表 1. 光伏电站基本信息

光伏电站	装机容量(MW)	纬度	经度	与嘉盛柯坪距离(km)	与嘉盛柯坪时差(min)
嘉盛柯坪	20	40.51	79.05	\	\
大唐阿克苏	20	40.65	80.27	103.7	3 min
正泰拜城	20	41.8	81.87	239.7	7 min
汉能新和	20	41.22	82.78	317.05	11 min
中节能轮台	20	41.78	84.27	443.7	17 min

4.1. 云量因子对相关性的影响

鉴于云量主要分为典型晴天、典型多云天、典型阴天, 选取不同天气下嘉盛柯坪光伏电站数据, 相应的天气如表 2 所示, 对应的功率曲线如图 1~3 所示。两两分别做同一光伏电站不同时段出力的相关系数计算, 比较分析云量因子对于同一光伏电站出力相关性的影响。

Table 2. Cloudiness

表 2. 云量情况

日期	编号	天气	日期	编号	天气	日期	编号	天气
7.15	A1	典型晴天	7.8	B1	典型多云天	7.26	C1	典型阴天
7.16	A2	典型晴天	7.25	B2	典型多云天	7.27	C2	典型阴天
7.17	A3	典型晴天	7.29	B3	典型多云天	7.28	C3	典型阴天

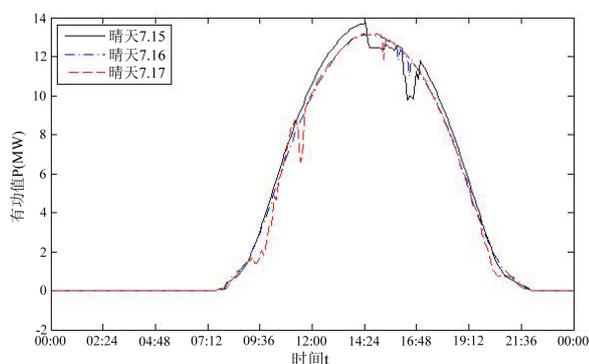


Figure 1. Output curve on sunny day

图 1. 晴天的功率曲线

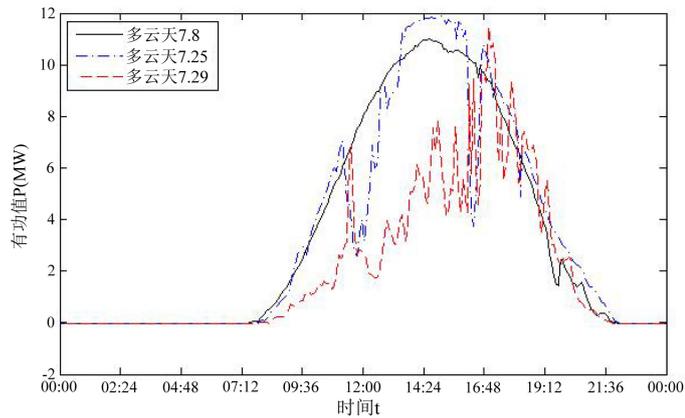


Figure 2. Output curve in cloudy day
图 2. 多云天的功率曲线

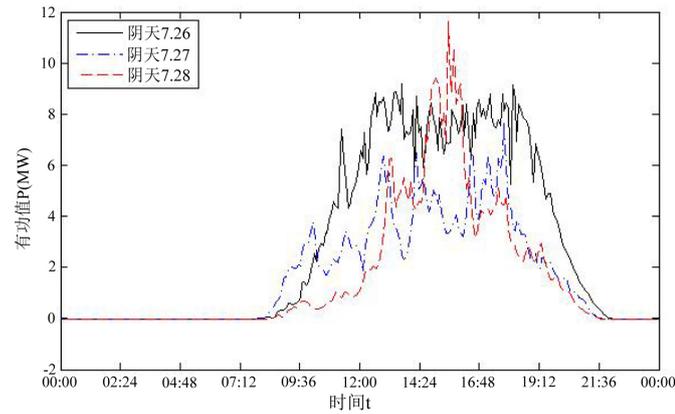


Figure 3. Output curve in overcast day
图 3. 阴天的功率曲线

经相关系数计算可得表 3，统计表 3 中数据可得表 4，最值角度排序：

$$\rho_{\text{晴天、晴天}}^{\min} > \rho_{\text{晴天、阴天}}^{\max} > \rho_{\text{多云天、阴天}}^{\max} > \rho_{\text{多云天、多云天}}^{\max} > \rho_{\text{阴天、阴天}}^{\max}。$$

上述分析表明，晴天与晴天的相关系数的最小值大于除了晴天与多云天组合之外的任意组合的最大值，表明同一光伏电站出力相关性最强，原因在于两者的云量因子接近且干扰因素较小。

Table 3. Coefficient of correlation under different cloud cover

表 3. 不同云量情况下的相关系数

	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
A1	1	0.9849	0.9823	0.9760	0.9337	0.8612	0.9716	0.9271	0.7966
A2	\	1	0.9969	0.9924	0.9554	0.8273	0.9674	0.9122	0.8369
A3	\	\	1	0.9979	0.9580	0.8342	0.9645	0.9141	0.8563
B1	\	\	\	1	0.9571	0.8293	0.9549	0.9113	0.8634
B2	\	\	\	\	1	0.8339	0.9210	0.8851	0.8942
B3	\	\	\	\	\	1	0.8713	0.8616	0.7660
C1	\	\	\	\	\	\	1	0.9141	0.8083
C2	\	\	\	\	\	\	\	1	0.7676
C3	\	\	\	\	\	\	\	\	1

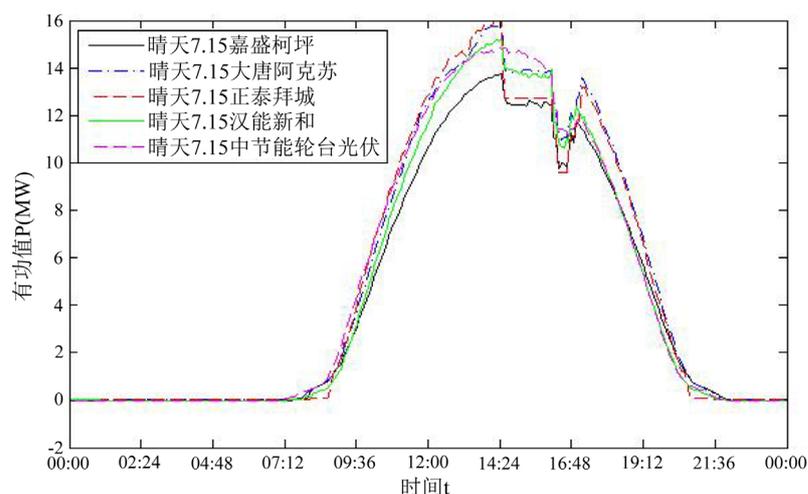
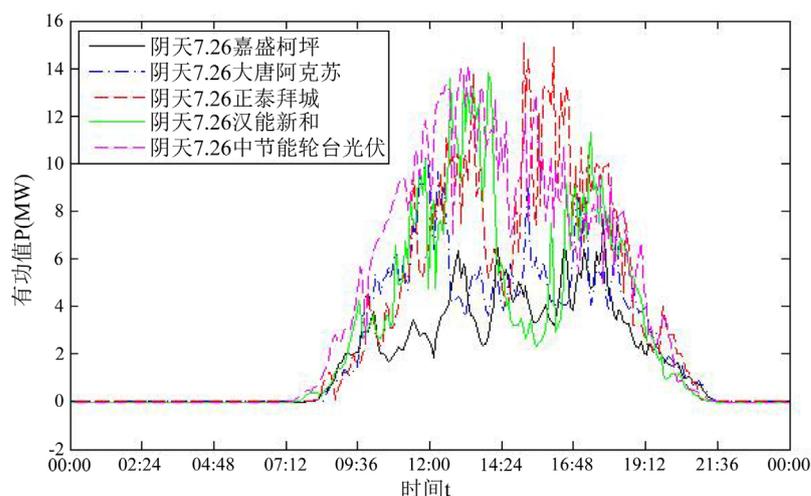
Table 4. Correlation coefficient statistics**表 4.** 相关系数统计

类型	晴天	晴天	晴天	多云天	多云天	阴天
	晴天	多云天	阴天	多云天	阴天	阴天
相关系数最大值	0.996957	0.997957	0.971692	0.957195	0.954995	0.914192
相关系数最小值	0.982314	0.827336	0.796622	0.829308	0.766062	0.767678

4.2. 地理位置对相关性的影响

以表 1 中嘉盛柯坪光伏电站为参考电站, 大唐阿克苏、正泰拜城、汉能新和、中节能轮台光伏电站作为比较电站, 5 个电站几乎在同一纬度, 但处于不同经度。

选取参考电站和比较电站 7 月同 1 天数据, 五个光伏电站功率曲线如图 4~6 所示, 两两分别做同一时段不同光伏电站出力的相关系数计算, 比较分析地理位置对于不同光伏电站出力相关性的影响。

**Figure 4.** Output curves of five power plants on sunny day**图 4.** 五个光伏电站晴天的功率曲线**Figure 5.** Output curves of five power plants on cloudy day**图 5.** 五个光伏电站多云天的功率曲线

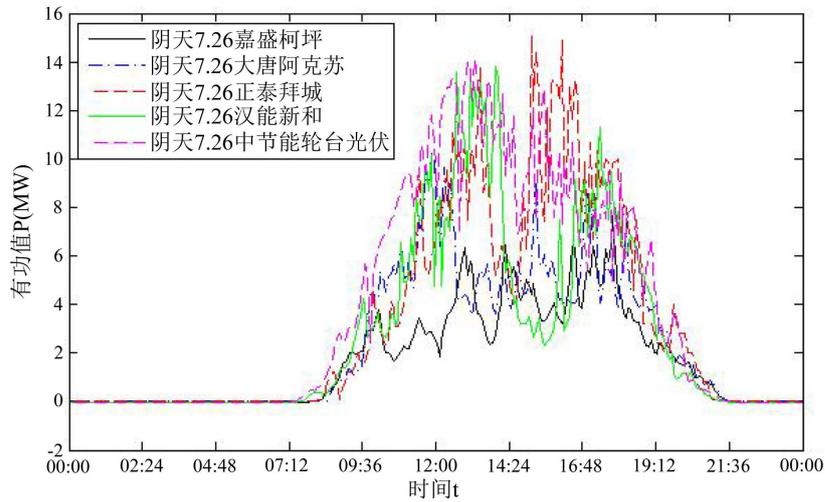


Figure 6. Output curves of five power plants on overcast day
图 6. 五个光伏电站阴天的功率曲线

表 5, 图 7~9 表明, 晴天和多云天情况下, 比较电站与参考电站的距离越远, 相关系数最大值所对应延时的绝对值越大。因此, 由于参考电站的出力序列的起始点和终止点晚于比较电站, 比较电站的出力序列只有经过延时, 不同地理位置的光伏电站出力相关性才能达到最强。阴天情况下, 相关系数最大值所对应延时的绝对值无明显规律, 波动较频繁, 原因在于受阴天影响, 光伏出力随机性大。

Table 5. Coefficient of correlation and delay of geographical location considering delay
表 5. 考虑延时的地理位置的相关系数及延时

	大唐阿克苏		正泰拜城		汉能新和		中节能轮台	
	最大值	延时	最大值	延时	最大值	延时	最大值	延时
晴天 7.15	0.9991	-1 min	0.99478	-3 min	0.9987	-4 min	0.9980	-11 min
多云天 7.25	0.9991	-1 min	0.9799	-3 min	0.9811	-8 min	0.9890	-14 min
阴天 7.26	0.8579	-39 min	0.8799	2 min	0.8277	-23 min	0.8809	-56 min

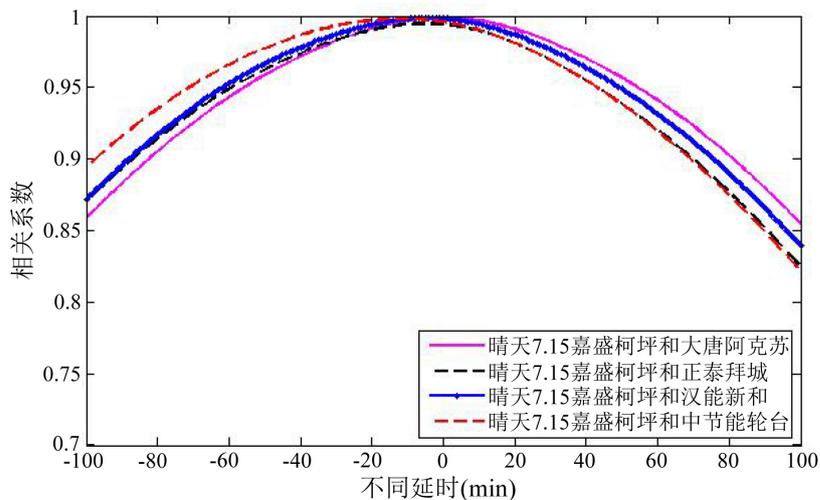


Figure 7. Delay characteristics of sunny day
图 7. 晴天的延时特性

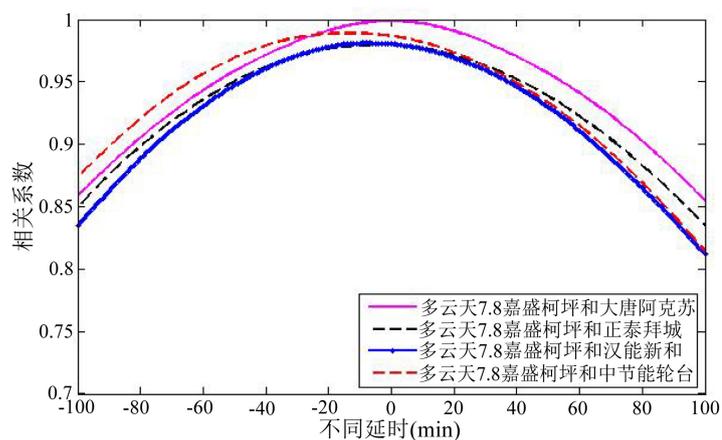


Figure 8. Delay characteristics of cloudy day

图 8. 多云天的延时特性

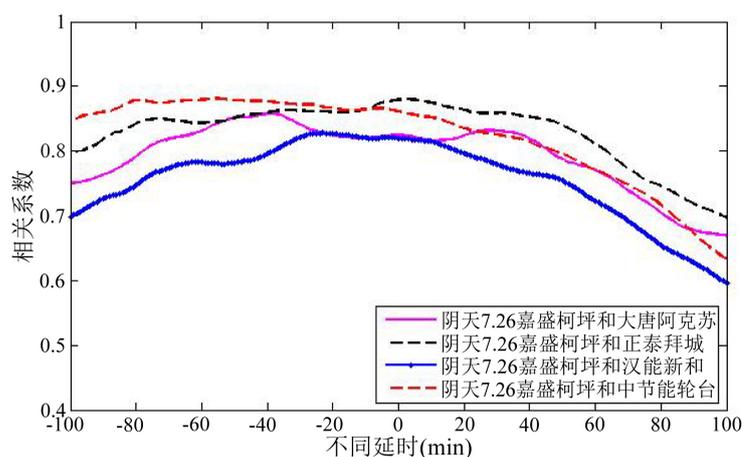


Figure 9. Delay characteristics of overcast day

图 9. 阴天的延时特性

5. 结论

本文基于实测数据分析阿克苏光伏电站出力的相关性。首先给出了两种类型的光伏电站出力相关性计算方法，然后从理论上分析了云量因子和地理位置对于光伏电站出力相关性的影响，最后用实测数据分析光伏电站出力相关性。

1) 晴天与晴天的相关系数的最小值大于除了晴天与多云天组合之外的任意组合的最大值，表明同一光伏电站出力相关性最强，原因在于两者的云量因子接近且干扰因素较小。

2) 晴天和多云天情况下，参考电站的出力序列的起始点和终止点晚于比较电站，比较电站的出力序列只有经过延时，不同地理位置的光伏电站出力相关性才能达到最强。

参考文献

- [1] Woyte, A., Van, V., Belmans, R., *et al.* (2006) Voltage Fluctuations on Distribution Level Introduced by Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **21**, 202-209. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.845454>
- [2] 张程飞, 刘纯, 王跃峰, 等. 基于模糊多目标优化的电网日前风电接纳能力评估模型[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 426-431.
- [3] 田建芳, 毛亚珊, 翟桥柱, 等. 基于风电消纳能力评估的安全约束经济调度方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9):

2398-2403.

- [4] Perez, R., Kivalov, S., Schlemmer, J., *et al.* (2012) Short-Term Irradiance Variability: Preliminary Estimation of Station Pair Correlation as a Function of Distance. *Solar Energy*, **86**, 2170-2176.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.02.027>
- [5] Hollands, K.G.T. and Huget, R.G. (1990) A Probability Density Function for the Clearness Index, with Applications. *Solar Energy*, **30**, 195-209.
- [6] Graham, V.A. and Hollands, K.G.T. (1990) A Method to Generate Synthetic Hourly Solar Radion Globally. *Solar Energy*, **44**, 333-341.
- [7] 姚荃. 考虑不确定因素的光伏发电出力预测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [8] 张曦, 康重庆, 张宁, 黄越辉, 刘纯, 徐健飞. 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.
- [9] 张慧玲, 喻洁, 韩红卫, 冯其芝. 间歇性新能源发电相关性分析[J]. 电气自动化, 2015, 37(5): 30-34.
- [10] 汪海瑛, 白晓民. 并网光伏的短期运行备用评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 55-60.
- [11] 李芝娟. 基于实测数据的风电场群功率特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [12] 崔杨, 李焕奇, 张节潭, 严干贵, 穆钢, 王茂春. 计及功率相关性的光伏电站群置信容量评估方法[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 1039-1044.

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: 2161-8763, 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: sg@hanspub.org