



# 太阳辐射对大型渔光互补光伏电站发电效益影响分析

## 摘要

以江苏宝应生态渔业光伏发电“领跑者”示范基地为研究对象,定量分析了不同辐射指标对渔光互补光伏发电效益的影响机制.结果表明:太阳辐射对渔光互补光伏电站发电效益有着显著影响,且存在季节性波动,在夏秋季日并网峰值及发电量较大,稳定性较高,而冬春季发电效益和稳定性较差;太阳辐射指标与日并网功率最大值相关性较高,且呈明显对数关系,而日发电量与太阳辐射指标呈明显线性关系;不同月份并网功率最大值和发电量与平均辐照度、最大辐照度和累计辐照量均呈正相关关系,影响月并网功率峰值最为明显的是最大辐照度,而影响月发电量最为明显的指标是有效利用小时数.通过研究发现,在该地区开展光伏发电功率预测和前期太阳能资源开发利用评估时,可采用平均辐照度、最大辐照度、日累计辐照量3个指标作为参考指标.

## 关键词

太阳辐射;渔光互补;光伏电站;并网;发电量

中图分类号 TK519

文献标志码 A

收稿日期 2020-11-16

资助项目 国家重点研发计划(2019QZKK0804);国网江苏省电力有限公司科技项目(52100219001M)

## 作者简介

雷震,男,硕士,高级工程师,主要从事新能源开发利用方面研究.barbells@sohu.com

郝雨辰(通信作者),男,博士,高级工程师,主要研究方向为新能源调度与运行.hao\_yuchen@126.com

## 0 引言

随着我国能源结构的不断调整优化,传统化石能源在能源结构中所占比重不断下降,清洁无污染的新能源所占比重不断上升<sup>[1]</sup>.太阳能作为一种取之不尽用之不竭的新能源,可以从根本上解决能源短缺和环境污染等问题,大力发展太阳能光伏发电,对落实新发展理念、促进绿色低碳循环发展具有重要意义<sup>[2-5]</sup>。“渔光互补”是一种将渔业养殖与光伏发电相结合,实现“一地多用、渔光互补”的发电新模式<sup>[4]</sup>,可以提高资源利用率和单位面积土地的经济价值,对光伏电站大范围落地应用具有重要的推动作用<sup>[5-7]</sup>.

光伏发电效益主要与光伏面板材质和外界环境有关<sup>[5,8-10]</sup>.非晶硅光伏面板输出能量主要取决于光谱分布,而多晶硅则对光谱分布不敏感<sup>[11]</sup>.对于外界环境对光伏发电效益的影响,大多从气象因素入手研究.黄伟等<sup>[8]</sup>分析了日照强度和云量对光伏发电的影响,确定了不同天气情况对光伏发电影响系数.褚华宇等<sup>[12]</sup>研究了雾霾对光伏发电功率的影响,并建立了考虑雾霾影响的光伏发电功率预测模型.崔永琴等<sup>[13]</sup>从面板积尘影响因素出发,研究了风力、降雨、空气污染、灰尘性质及面板倾角等对光伏发电效益的影响.曹英丽等<sup>[14]</sup>通过对光伏发电功率与同期气象影响因子进行相关性分析发现,太阳辐射量、日照时数与光伏发现效益相关性最高.Kymakis等<sup>[15]</sup>将太阳辐照度作为光伏电站选址的重要参考指标.虽然国内外学者对光伏发电效益的影响因素进行了深入研究,但大多集中于陆面光伏电站,而对建于水面上的“渔光互补”光伏电站鲜有涉及.由于渔光互补光伏电站下垫面性质不同于常规陆面光伏电站,电站周围形成的典型小气候导致其发电效益影响因素也会与常规陆面光伏电站不同,但目前关于“渔光互补”光伏电站发电效益的气象影响因素研究尚不多见,尤其是太阳辐射对其影响规律尚不清楚.

本文以江苏宝应生态渔业光伏发电“领跑者”示范基地为研究对象,详细分析太阳辐射对该地区光伏发电效益的影响规律,为提高渔光互补光伏电站太阳能利用效益和功率预报准确率提供技术支持.

## 1 研究区概况

宝应光伏发电示范基地是国家能源局批复的第三批全国10个领跑基地之一,位于江苏省扬州市宝应县,亚热带季风性湿润气候,多

1 国网江苏省电力有限公司 调度控制中心, 南京,210024

2 国网江苏省电力有限公司 扬州供电分公司,扬州,225001

年平均降水量 966 mm,日照时数 2 181 h,年平均气温 14.4 °C,全年无霜期 260 d.基地占地面积为 4 267 hm<sup>2</sup>,采用“渔光互补”开发方式,在鱼塘水面上方架设光伏面板阵列,光伏面板下方水域可以进行鱼虾养殖等渔业活动.基地光伏电站建设容量为 500 MW,面板安装倾角为 30°.

## 2 数据来源与预处理

本文数据资料主要来自宝应光伏发电示范基地中广核柳堡电站 2019 年逐日光伏发电资料,该电站共装设 317 462 块 315 W 高效单晶双面 P 型半片,华为 70 和 100 kW 逆变器分别为 1 015 台和 172 台,装机容量 100 MW.气象数据来自于宝应县气象局(119.18°E,33.14°N)和基地电站实际观测数据(119.69°E,33.28°N).发电效益数据主要选择日实际发电量、日并网最大功率、月实际发电量、月发电峰值等 4 个指标,其中:月实际发电量为每月日实际发电量之和,月发电峰值为每月日并网最大功率之和;太阳辐射数据主要选择日平均辐照度( $R_{avg}$ )、日最大辐照度( $R_{max}$ )、日累计辐照量( $R_{sum}$ )、日有效利用小时数( $H$ )等 4 个指标.由于可能会遇到设备故障进行组件检修或不可控气象灾害影响,光伏面板并非时刻处于正常运行状态,使得自动采集的某些数据存在较大偏

差,出现部分资料缺失或异常情况,本文对环境观测资料和运行日志数据进行预处理,剔除故障数据和疑误数据,并采用插值法进行数据补全.为了更加客观地反映辐射指标对发电效益的影响,本文采用气象站和电站实际观测值的平均值进行分析.

## 3 结果与分析

### 3.1 发电效益指标年内变化特征

不同月份并网最大功率与发电量分布如图 1 所示.平均月发电峰值为 68.0 MW,而 9 月的发电峰值最大,较均值提高了 16.2%,1 月发电峰值最小,较均值降低了 37.4% (图 1a).月发电峰值超过 70 MW 的月份还有 3 月、6 月、7 月、8 月、10 月.从月发电峰值的标准差可以看出,6 月的发电峰值波动最小,而 2 月波动最大.总体而言,月发电峰值波动与季节相关性较高,5—10 月夏秋季波动幅度较小,其他月份波动幅度较大.与月发电峰值规律类似,3 月和 6—9 月的月发电量较高,均超过了 400 MW,而 1 月的月发电量最低,仅为 159 MW (图 1b),但 1 月发电量波动最小,稳定性最好.

### 3.2 全年尺度下日发电量及峰值与辐射指标回归分析

日并网功率最大值与太阳辐射指标之间呈现明

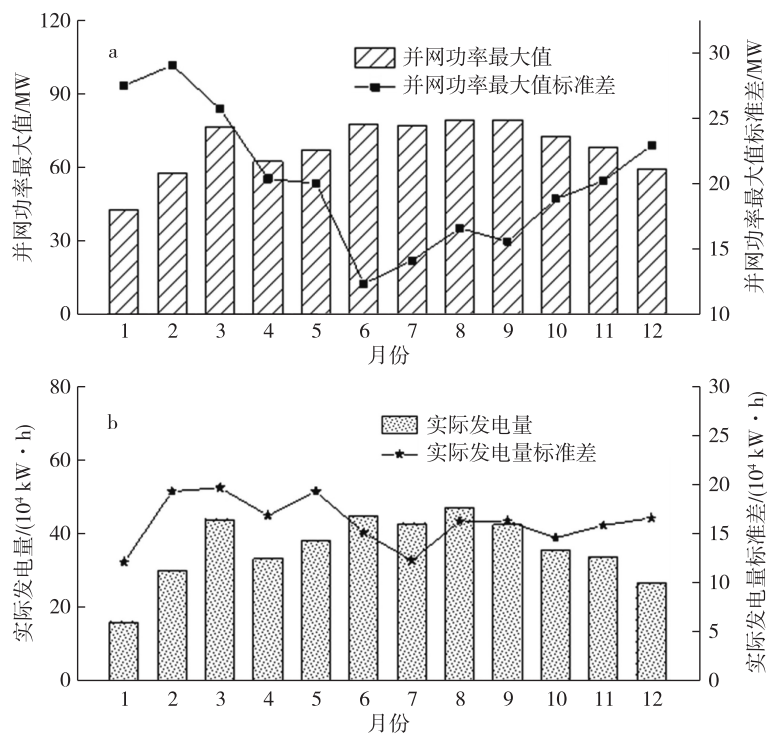


图 1 逐月并网最大功率值与实际发电量统计特征

Fig. 1 Statistics of peak grid-connected power and actual power generation in each month

显对数关系(图2).日并网功率最大值与平均辐照度、最大辐照度和日累计辐照量之间相关性较高,相关系数均超过了0.80,说明随辐射强度的增加,日并网功率最大值呈先急剧增加后逐渐趋缓的自然对数关系,但并网峰值上线阈值在90 MW左右;日并网功率最大值与日有效利用小时数之间相关度与前述3项指标相比较弱,拟合效果较差, $R^2$ 仅为0.70.因此,在该地区开展光伏发电功率预测和前期太阳能资源开发利用评估时,可采用平均辐照度、最大辐照度、日累计辐照量3个指标作为参考指标,其预测和评估结果要比采用太阳总辐射、直射辐射更为合理;另外,可以通过平均辐照度、最大辐照度和日累计辐照量等指标来估算最大并网峰值.

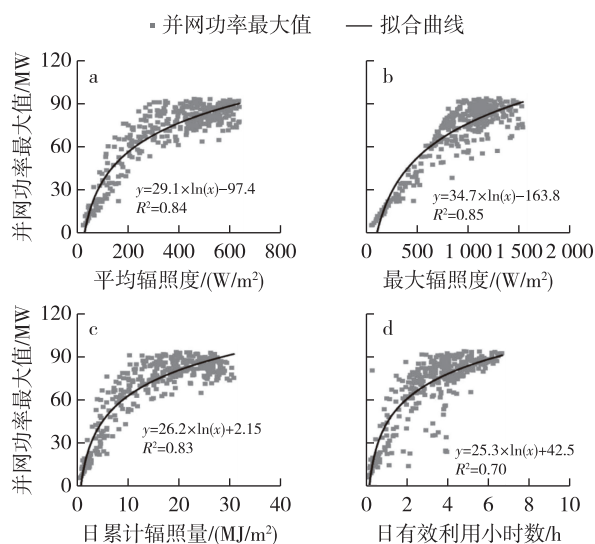


图2 日并网最大功率值与太阳辐射指标的散点图

Fig. 2 Scatter plot of daily peak grid-connected power and solar radiation indices

与日并网功率最大值规律不同,日实际发电量与太阳辐射相关指标呈现线性关系(图3).日实际发电量与平均辐照度呈显高度线性关系,平均辐照度每增加100个单位,日实际发电量增加10个单位.日累计辐照量、日有效利用小时数和日实际发电量之间的关系与平均辐照度类似,线性关系较为明显,拟合趋势线方程 $R^2$ 均超过0.95.最大辐照度与日实际发电量之间相关性较低, $R^2$ 仅为0.55,这主要是因为日实际发电量由全天累计辐照量大小决定,而最大辐照度的影响时段较短,无法反映整天阳光辐射的情况.因此在进行资源评估和发电总量预测时,可采用平均辐照度和日累计辐照量两个指标进行资源评估和远景预估.

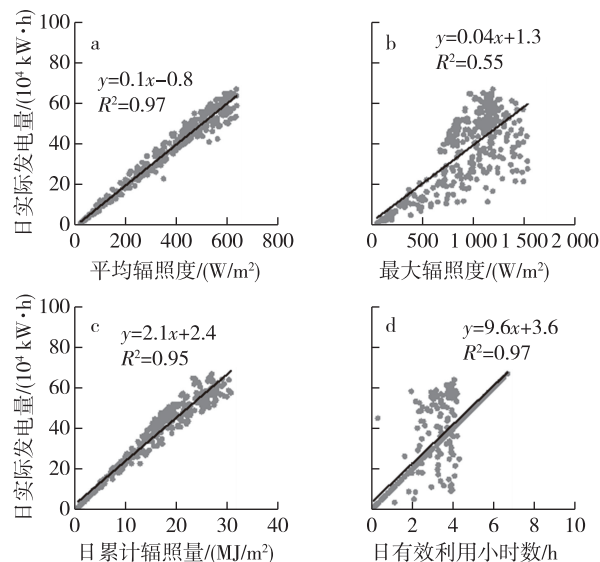


图3 日实际发电量与太阳辐射指标的散点图

Fig. 3 Scatter plots of daily power generation and solar radiation indices

### 3.3 不同月份峰值及发电量与辐射指标相关分析

不同月份并网功率最大值与太阳辐射指标相关分析结果如表1所示.平均辐照度、最大辐照度和日累计辐照量与日并网功率峰值之间呈显著正相关关系,相关性均通过了0.01显著性水平,但除了最大辐照度在3—5月、11—12月相关系数超过0.9以外,其他各指标相关系数均未超过0.9,这种结果与实际相符,因为月最大辐照度高低决定月并网峰值

表1 不同月份日并网功率最大值与太阳辐射指标相关分析

Table 1 Correlation between solar radiation indices and daily peak grid-connected power in each month

月份	平均辐照度	最大辐照度	日累计辐照量	日有效利用小时数
1	0.633**	0.880**	0.603**	0.856**
2	0.784**	0.864**	0.799**	0.905**
3	0.870**	0.958**	0.850**	0.876**
4	0.827**	0.922**	0.832**	0.632**
5	0.790**	0.910**	0.790**	-0.315
6	0.674**	0.750**	0.675**	0.015
7	0.635**	0.883**	0.649**	0.113
8	0.826**	0.892**	0.823**	0.834**
9	0.773**	0.874**	0.774**	0.785**
10	0.689**	0.763**	0.679**	0.740**
11	0.819**	0.969**	0.812**	0.815**
12	0.887**	0.961**	0.885**	0.885**

注:\*\*表明在0.01水平上显著相关;\*表明在0.05水平上显著相关.

大小,而平均辐照度、累计辐照量大小则主要决定月实际发电量高低.但从表1分析发现,1—4月和8—12月日并网功率峰值与日有效利用小时数之间呈显著正相关关系,而5—7月相关性却不显著,尤其是在5月日并网功率峰值与日有效利用小时数呈负相关关系,与实际规律差异较大,其中原因待进一步研究.

不同月份发电量与辐射指标相关分析结果如表2所示.从表2发现:该地区月实际发电量与平均辐照度呈现出极显著正相关,除了1—3月外,其他月份相关系数都超过0.9;最大辐照度与月实际发电量之间也呈现出较强相关性,但和其他3个指标相比,其相关系数相对较小,全年都未达到0.9,这种情况与理论实际都比较一致,因为最大辐照度只决定每个月最大发电量值,不能决定月发电量;月累计辐照度与月实际发电量之间呈现出极显著正相关性,除了1月和3月,其他月份相关系数都超过了0.9;和其他几个辐射因子相比,月有效利用时数和月实际发电量之间相关性出现异常,4—7月与实际发电量之间相关性不显著,其中5月出现了负相关,而1—2月和8—12月日发电量与日有效利用小时数之间呈显著正相关关系,月有效利用时数与并网峰值相关性分析呈现出同样结果.这一方面可能是该电站这几个日有效利用小时数指标观测出现问题或者观测设备出现问题,应及时检查检验观测数据和设备;另

表2 不同月份实际发电量与太阳辐射指标相关分析

Table 2 Correlation between solar radiation indices and actual power generated in each month

月份	平均辐照度	最大辐照度	月累计辐照量	月有效利用小时数
1	0.857**	0.845**	0.838**	1.000**
2	0.898**	0.803**	0.910**	1.000**
3	0.894**	0.800**	0.884**	0.887**
4	0.995**	0.723**	0.998**	0.461*
5	0.913**	0.632**	0.916**	-0.255
6	0.992**	0.242	0.994**	0.162
7	0.970**	0.427*	0.990**	0.198
8	0.997**	0.641**	0.997**	1.000**
9	0.987**	0.606**	0.996**	1.000**
10	0.986**	0.548**	0.978**	1.000**
11	0.997**	0.700**	0.997**	1.000**
12	0.999**	0.789**	1.000**	1.000**

注:\*\*表明在0.01水平上显著相关;\*表明在0.05水平上显著相关.

一个方面也可能是在电站设计、评估、功率预报和远景评估时,采用平均辐照度、累计辐照度能客观反映电站实际发电情况,能更科学地为发电企业提供可参考的决策支持.另外,建于水面之上的渔光互补光伏电站,夏季高温容易引起周围空气湿度变大,消减太阳辐射强度,使得水面对辐射反射等引起异常.

### 3.4 不同月份峰值及实际发电量与不同辐射指标回归分析

不同月份日并网功率最大值与太阳辐射指标的回归分析结果如表3所示,可以发现日并网功率最大值与辐射指标呈显著对数关系,其中影响1月、3月、5—9月和11—12月日并网功率最大值的关键辐射指标为最大辐照度,日并网功率最大值与最大辐照度呈显著自然对数关系,除1月、6月和11月外,其余月份 $R^2$ 均超过了0.80.影响2月和10月日并网功率最大值的关键辐射指标为日有效利用小时数,而影响4月日并网功率最大值的关键辐射指标为日累计辐照量.

表3 逐月并网功率最大值回归分析

Table 3 Regression analysis of daily peak grid-connected power in each month

月份	回归方程	$R^2$
1	$y = 29.1 \ln(R_{\max}) - 131.1$	0.75
2	$y = 29.2 \ln(H) + 34.3$	0.84
3	$y = 37.7 \ln(R_{\max}) - 177.6$	0.94
4	$y = 25.4 \ln(R_{\text{sum}}) - 3.8$	0.87
5	$y = 38.8 \ln(R_{\max}) - 200.9$	0.83
6	$y = 46.5 \ln(R_{\max}) - 249.1$	0.63
7	$y = 40.8 \ln(R_{\max}) - 131.2$	0.88
8	$y = 40.9 \ln(R_{\max}) - 131.2$	0.87
9	$y = 46.5 \ln(R_{\max}) - 131.2$	0.86
10	$y = 27.5 \ln(H) + 40.9$	0.69
11	$y = 34.3 \ln(R_{\max}) - 156.0$	0.78
12	$y = 40.1 \ln(R_{\max}) - 195.0$	0.90

不同月份发电量与太阳辐射指标的回归分析结果如表4所示,可以发现,发电量与太阳辐射指标呈显著线性相关,拟合度均较高.影响1—3月和8—12月发电量的关键辐射指标是有效利用小时数,随着有效利用小时数增加,发电量呈线性增加趋势;而影响4—7月发电量的关键辐射指标为累计辐照量,发电量随累计辐照量增加而线性增加.从以上研究发现,影响该地区月发电量的主要辐射因子为有效利用小时数和累计辐照量.

表4 逐月实际发电量回归分析

Table 4 Regression analysis of actual power generated in each month

月份	回归方程	$R^2$
1	$y = 10H$	1.00
2	$y = 10H$	1.00
3	$y = 0.9H + 3.7$	0.79
4	$y = 1.9R_{\text{sum}} + 0.97$	0.99
5	$y = 1.9R_{\text{sum}} + 1.16$	0.84
6	$y = 2.0R_{\text{sum}} + 3.6$	0.99
7	$y = 2.7R_{\text{sum}} + 2.3$	0.98
8	$y = 10H$	1.00
9	$y = 10H$	1.00
10	$y = 10H$	1.00
11	$y = 10H$	1.00
12	$y = 10H$	1.00

## 4 结论与讨论

太阳辐射对渔光互补发电效益影响显著,且不同月份辐射指标对发电效益影响存在明显差异.具体结论如下:

1) 渔光互补光伏电站发电的实际效能存在显著季节差异,其中夏秋季日并网峰值及发电量较大,且稳定性较高,而冬春季发电效益和稳定性较差.

2) 全年尺度下日并网功率最大值与太阳辐射各指标呈明显的自然对数关系,而日发电量与太阳辐射呈明显的线性关系.在该地区开展光伏发电功率预测和前期太阳能资源开发利用评估时,可采用平均辐照度、最大辐照度、日累计辐照量3个指标作为参考指标,其预测和评估结果要比采用太阳总辐射、直射辐射更为合理.

3) 不同月份并网功率最大值和月发电量与太阳辐射指标相关性不同,夏秋季与太阳辐射相关性较低,而冬春季与太阳辐射相关性较高.不同月份下并网功率最大值和月发电量均与平均辐照度、最大辐照度和日累计辐照量呈正相关关系.在电站设计、评估、功率预报和远景评估时,采用平均辐照度、累计辐照度能客观反映电站实际发电情况,能更科学地为发电企业提供可参考的决策支持.

4) 影响不同月份并网功率最大值和发电量的关键辐射指标略有差异.影响并网功率最大值月份最多的辐射指标是日最大辐照度,而影响发电量月份最多的指标是有效利用小时数.

## 参考文献

### References

- [1] 杨芬,郭广生,张士运.技术创新、产业结构调整与能源消费[J].中国科技论坛,2020(6):75-84  
YANG Fen, GUO Guangsheng, ZHANG Shiyun. Technological innovation, industrial structure adjustment and energy consumption[J]. Forum on Science and Technology in China, 2020(6):75-84
- [2] 胡云岩,张瑞英,王军.中国太阳能光伏发电的发展现状及前景[J].河北科技大学学报,2014,35(1):69-72  
HU Yunyan, ZHANG Ruiying, WANG Jun. Development status and prospect of solar photovoltaic power generation in China[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014,35(1):69-72
- [3] 马宁.太阳能光伏发电概述及发展前景[J].智能建筑电气技术,2011,5(2):25-28  
MA Ning. Overview and development prospects on solar photovoltaic [J]. Electrical Technology of Intelligent Buildings, 2011,5(2):25-28
- [4] 江富平.光伏发电项目综合效益评价研究[D].武汉:湖北工业大学,2016  
JIANG Fuping. The study of comprehensive benefit evaluation in photovoltaic power generation project: an example of "fishing complementary" photovoltaic power plant [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016
- [5] 郭晨,江代君,孙子元,等.渔光互补光伏电站中 PERC 单晶组件发电效益研究分析[J].工程建设与设计,2019(3):97-99  
GUO Chen, JIANG Daijun, SUN Ziyuan, et al. Research and analysis on the benefit of PERC single crystal module in Yuguang complementary photovoltaic power plant [J]. Construction & Design for Engineering, 2019(3):97-99
- [6] 王鹏,王浩军,薛桂庭.浅谈渔光互补光伏发电项目工程总承包项目技术要点分析[J].中国战略新兴产业,2018(40):80  
WANG Peng, WANG Haojun, XUE Guiting. Analysis on technical points of general contracting project of fishery & photoelectricity complementary photovoltaic power generation project [J]. China Strategic Emerging Industry, 2018(40):80
- [7] 辛硕,李志攀,张统,等."渔光互补"项目的应用及效益分析[J].科技经济导刊,2018(21):138  
XIN Shuo, LI Zhipan, ZHANG Tong, et al. Application and benefit analysis of "fishery & photoelectricity complementary" project [J]. Technology and Economic Guide, 2018(21):138
- [8] 黄伟,张田,韩湘荣,等.影响光伏发电的日照强度时间函数和气象因素[J].电网技术,2014,38(10):2789-2793  
HUANG Wei, ZHANG Tian, HAN Xiangrong, et al. Sunlight intensity time function and weather factors influencing photovoltaic generation [J]. Power System Technology, 2014,38(10):2789-2793
- [9] 鞠平,刘婧孜,秦川,等.基于神经网络的光伏电站气象-功率模型[J].河海大学学报(自然科学版),2020,

48(3):268-275

JU Ping, LIU Jingzi, QIN Chuan, et al. Neural network based model of photovoltaic output power-weather information[J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2020, 48(3):268-275

- [10] 吕学梅,孙宗义,曹张驰.电池板温度和辐射量对光伏发电量影响的趋势面分析[J].可再生能源,2014,32(7):922-927

LÜ Xuemei, SUN Zongyi, CAO Zhangchi. A trend surface analysis on effect of battery plate temperature and radiation levels on PV power output [ J ]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(7):922-927

- [11] Alonso-Abella M, Chenlo F, Nofuentes G, et al. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV ( photovoltaic ) technologies; the case of four specific sites [ J ]. Energy, 2014, 67:435-443

- [12] 褚华宇,高志强,盛四清.计及雾霾影响的光伏功率预测方法[J].河北电力技术,2014,33(5):23-26

CHU Huayu, GAO Zhiqiang, SHENG Siqing. Photovoltaic

power prediction method based on influence of fog and haze [ J ]. Hebei Electric Power, 2014, 33(5):23-26

- [13] 崔永琴,冯起,孙家欢,等.积尘对光伏电站发电功率的影响研究综述[J].中国沙漠,2018,38(2):270-277

CUI Yongqin, FENG Qi, SUN Jiahuan, et al. Review on the impact of dust accumulation on photovoltaic power output [ J ]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2):270-277

- [14] 曹英丽,方诗琦,王洋,等.分布式光伏发电特性与气象影响因子诊断分析[J].沈阳农业大学学报,2018,49(3):363-370

CAO Yingli, FANG Shiqi, WANG Yang, et al. Diagnostic analysis of distributed photovoltaic power characteristics and the impact of meteorological factors [ J ]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(3):363-370

- [15] Kymakis E, Kalykakis S, Papazoglou T M. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete [ J ]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3):433-438

## Solar radiation influence on power generation benefit of large-scale fishery solar complementary photovoltaic power station

LEI Zhen<sup>1</sup> HAO Yuchen<sup>1</sup> KONG Bojun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dispatching Control Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024

<sup>2</sup> Yangzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225001

**Abstract** The relationship between solar radiation indices and power generation efficiency were quantitatively studied in the fishery-solar hybrid photovoltaic power station in Baoying, Jiangsu. The results showed that solar radiation significantly impacted the power generation efficiency with visible seasonal fluctuations. Specifically, the daily peak of grid connected power and the power generation capacity were larger and more stable in summer and autumn, compared with those in winter and spring. Obvious logarithmic/linear correlation was observed between solar radiation indices and the daily peak grid connected power/daily power generation capacity, respectively. The daily peak of grid connected power and power generation capacity were correlated positively with average radiation, max radiation, and accumulated radiation in each month. The max radiation imposed the strongest influence on the peak value of grid-connected power, while the available sunshine hours showed the strongest influence on the monthly power generation capacity. The study indicated that average radiation, max radiation, and accumulated radiation should be taken as major indices in evaluating solar energy utilization and photovoltaic power station development.

**Key words** solar radiation; fishery-solar complementary; photovoltaic power station; grid-connected; power generation capacity