

光伏发电参与电力平衡的可信容量分析

张 韵¹, 陈 哲², 安海云²

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

2. 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 南京 211103)

摘要:光伏发电是新型能源体系的重要组成部分,“十四五”期间我国光伏发电装机规模快速增长。光伏发电与天气强相关,随机性和波动性强,高比例光伏并网加大了电力系统平衡难度。通过详细分析高温天气下光伏发电出力特性,指出高温天气下光伏发电具有较高的日间顶峰能力,基于可信容量分析论证了提高极端高温天气下光伏发电参与电力平衡的合理性。最后计算验证了提高极端高温天气下光伏发电可信容量可降低日间电力平衡缺口,给出了光伏参与电力平衡的相关建议。

关键词:光伏发电;极端高温;电力平衡;可信容量

Analysis on the credible capacity of photovoltaic power generation participating in power balance

ZHANG Yun¹, CHEN Zhe², AN Haiyun²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Photovoltaic power is an important part of the new energy system, the installed capacity of photovoltaic power is growing rapidly during the 14th Five-Year Plan in China. Photovoltaic power has strong randomness and volatility because of the strong correlation between photovoltaic power and weather, the high proportion of photovoltaic grid-connected increases the difficulty of power balancing in power system. The output characteristics of photovoltaic power under high temperature climate are analyzed in detail, and the view that photovoltaic power generation has a higher daytime peak capacity in high temperature weather is pointed out, and then the rationality of improving the credible capacity of photovoltaic power generation in extreme high temperature weather to participate in power balance is demonstrated. Finally, the calculation verified that increasing the credible capacity of photovoltaic power generation in extreme high temperature weather could reduce the daytime power balance gap, relevant work suggestions about photovoltaic participating in power balance are proposed.

Key words: photovoltaic power; extreme high temperature; power balance; credible capacity

0 引言

可再生能源发电是实现我国双碳目标的重要路径之一。“十三五”期末,我国可再生能源发电装机达到9.34亿kW,占发电总装机的42.5%,风电、光伏发电、水电、生物质发电装机分别达到2.8亿kW、2.5亿kW、3.4亿kW、0.3亿kW,连续多年稳居世界第一^[1]。随着国家支持新能源政策的不断推动以及光伏发电成本的逐步下降,光伏发电装机将继续增长。

由于光伏发电与气象条件强相关,间歇性与波动性强,在电力平衡中如何考虑其发电容量受到电力系统规划与运行人员的高度关注。在光伏发电出

力特性方面,文献[2—3]分别分析了典型光伏电站与大型风光基地出力特性,指出光伏出力白天高,夜间无出力的规律,并且风光出力存在较为明显的互补态势。在光伏发电参与电力平衡必要性方面,文献[4]论述了新能源纳入电网运行备用的必要性,指出若新能源完全不纳入备用,全部由火电提供备用的方式无法满足新能源充分消纳的需求。文献[5]证明了在保持系统可靠性不变的前提下光伏发电接入系统可减少常规机组发电容量。在光伏发电置信容量方面,文献[6—7]建立了光伏电站不同的出力优化模型以提高光伏发电置信容量的计算精度。在光伏发电参与电力平衡方法方面,文献[8]基于新能源发电功率历史数据的统计学特征,提出了采用新能源保证出力、新能源保证预测准确率对应的新能源出力参与电力平衡的方法和对策。文献[9—10]

收稿日期:2023-11-25;修回日期:2024-01-04

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5400-202318203 A-1-1-ZN)

提出在提高新能源发电占比的同时统筹建设其他常规以及调峰电源、发展可控负荷等需求侧响应方法以及储能等手段。

面对持续快速增长的新能源装机及并网容量,新能源参与电力平衡的需求愈加迫切。深度挖掘新能源参与电力平衡可信容量,可减少传统调峰电源装机或开机,兼顾供电安全和新能源消纳,提高电力系统运行整体效益。基于江苏省连续高温期间用电负荷、风电、光伏发电等运行数据,详细分析了高温天气下光伏发电出力特性以及与负荷的相关性,指出极端高温天气下光伏发电出力处于较高水平,具有较高的日间顶峰能力,随后研究提出高温天气下光伏发电参与电力平衡可信容量的变化趋势及建议,提出了光伏参与电力平衡的相关建议。

1 高温天气下光伏发电出力特性

1.1 高温天气对光伏发电功率影响分析

光伏电池发电效率与温度直接相关,一般情况下,光伏硅组件的功率输出具有负温度系数,大约为 $(-0.4\% \sim -0.5\%)/^{\circ}\text{C}$ ^[11]。2022年夏季江苏全省遭受连续极端高温天气,平均气温异常偏高,为1961年以来最高。全省总高温日数和连续高温日数明显增多,高温强度同比2021年明显增强。

统计2022年5月份和8月份1至15日总发电功率,如图1所示,结果可见,5月份光伏发电出力波动性较大,总发电功率最高13 920 MW,平均10 746 MW;8月份光伏发电功率较为稳定,总发电功率最高12 867 MW,平均12 168 MW。在晴朗少云天气,由于8月份气温高于5月份,8月份光伏发电功率低于5月份同期,如1至5日期间。在阴雨多云天气,受云系遮挡影响,8月份光伏发电功率反高于5月份,如10至15日期间。主要原因是由于江苏夏季极端高温天气通常由副热带高压控制,在卫星云图上,副热带高压主要表现为无云区。因此,极端高温天

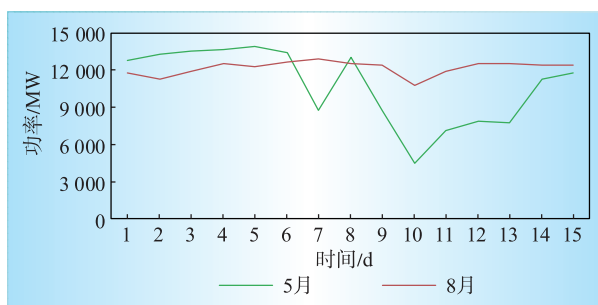


图1 2022年江苏光伏电站总发电功率

Fig. 1 Total power generation of PV power stations in Jiangsu in 2022

气发生期间,全省基本上全部处于晴朗无云天气,虽然此时局部区域光伏电站发电功率低于5月份,但光伏总发电功率更高。

统计8月1日至15日期间全省光伏发电同时率可发现,极端高温天气下光伏总发电的同时率维持在50%~60%之间,2022全年总发电功率最高同时率为69.9%。可见,极端高温天气下光伏发电可保持稳定的高功率输出状态。

1.2 高温天气下光伏发电对负荷的影响分析

从负荷相关性上看,高温天气光伏发电对日间高峰正调峰效益显著。分析2022年8月5日江苏光伏发电出力对负荷峰谷差的影响,见图2所示,图中净负荷为用电负荷与光伏出力的差值。当日全省用电负荷最高13 140万kW,出现在10:50;最低9 817万kW,出现在4时50分,负荷峰谷差3 323万kW。扣除光伏发电平衡的部分负荷后,净负荷峰值为12 120万kW,出现在20:30,谷值未变,峰谷差为2 303万kW。光伏接入后负荷峰值由日间移到夜间,最大峰谷差减小了1 020万kW。从江苏当前的光伏装机规模看,高温天气下光伏发电对电网产生的正调峰效果十分显著。

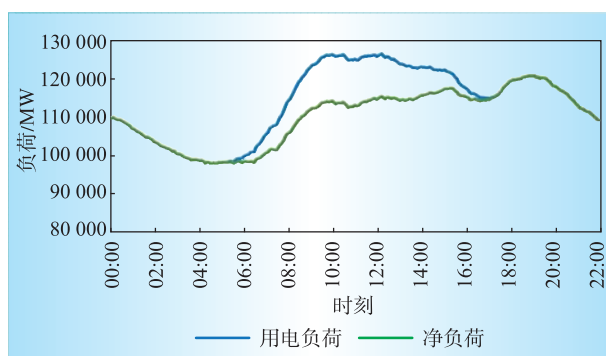


图2 8月5日全省用电负荷和用电净负荷

Fig. 2 Electric load and net load of the whole province on August 5th

1.3 负荷高峰时段光伏发电顶峰能力分析

从运行特性上看,光伏发电在高温天气下具备对日间高峰负荷稳定的顶峰能力。统计8月1~15日连续高温期间光伏分时发电数据,可知光伏在日间高峰(10:00—14:00)的平均出力为1 169.7万kW,占日最高出力平均值的94.88%;同时段风电平均出力211.1万kW,占最高出力平均值的28.14%。

通过计算可知8月1—15日光伏日间高峰发电出力平均标准差为51.7万kW,平均标准差系数为4.4%;风电则分别为31.9万kW、16.6%。可见,日间高峰期光伏发电离散程度小,与风电相比具备较高的稳定性。持续高温期间光伏发电具备日间高峰

稳定顶峰能力。

可见,光伏大发期集中在日间高峰时间段,该时段风电处在小发期。光伏和风电出力日最大值、最小值和平均值变化趋势如图3所示。极端高温天气下,负荷通常会突破原有最大预测值,电力平衡难度大。而高峰负荷与极端高温天气强相关,持续时间较短,同一时期光伏发电出力水平较高,能够为极端高温天气下日间高峰电力平衡起到重要支撑作用。同时,极端高温天气下光伏发电规律性较强,且与高峰负荷时间分布相似,具备以更高可信容量参与电力平衡的条件。

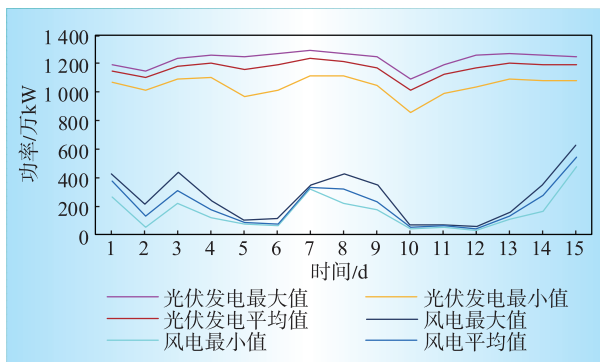


图3 8月1至15日10:00—14:00光伏、风电日发电曲线
Fig. 3 Daily power generation curves of photovoltaic power and wind power at 10:00–14:00 from August 1st to August 15th

2 高温天气下光伏发电可信容量分析

从江苏电力供需平衡上看,光伏已成为夏季高温期间电力供应第二大电源。2022年夏季江苏全省最高用电负荷1.314亿kW,同时刻光伏发电出力1106.89万kW,占用电负荷的8.42%。在电力平衡分析中提高光伏发电可信容量可有效降低系统调节成本。

新能源的可信容量在电力平衡中又可称作保证出力,其指在一定的概率 $C\%$ 下,新能源能够保证的最低出力,可作为该概率下的新能源参与电力平衡的依据^[12]。

高温天气下光伏发电可信容量可用光伏发电历史实际功率序列统计得出。将上述概率 $C\%$ 称为置信概率,对应的光伏发电可信容量的计算方法如下:对于历史光伏发电实际功率序列 $P_a = \{P_{a1}, P_{a2}, \dots, P_{an}\}$ ($P_{a1} < P_{a2} < \dots < P_{an}$, n 为统计周期内样本总数),其置信概率对应的分位数为 $N_c\%$,可以按式(1)计算。其中, $N_c\%$ 为一个整数,满足 $1 \leq N_c\% \leq n$, floor 表示向下取整

$$N_c\% = \max\{\text{floor}[n(1 - C\%), 1]\} \quad (1)$$

按照分位数索引,从实际发电负荷率升序序列 P_a 中找出对应的数值,即为 $C\%$ 置信概率对应的可信容量 P_{guar} ,见式(2)

$$P_{\text{guar}} = P_a(N_c\%) \quad (2)$$

选取8月1日至15日日间高峰10:00—14:00间隔5 min的光伏发电数据进行分析,如图4所示。95%置信概率下光伏可信容量为10 378 MW,占光伏总装机的48.7%。可见,在开展极端高温天气条件的特殊场景电力平衡分析,可以适当增大光伏发电参与电力平衡的置信容量。

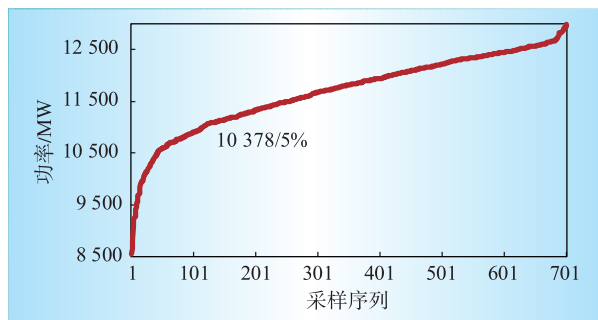


图4 极端高温期间95%置信水平下光伏发电可信容量
Fig. 4 Credible capacity of photovoltaic power generation at 95% confidence level during extreme high temperature

3 高温天气下光伏发电参与电力平衡分析

3.1 大规模光伏并网将提高日高峰电力保供能力

光伏发电曲线特征明显,规律性较强,在夏季高温天气与空调负荷增长保持较高的正相关性,在日间高峰具备稳定的持续供电能力,能够作为夏季高温天气日间增量高温负荷的保供电源,提高电网保供能力。按照江苏电网统计数据,光伏装机容量占最高负荷的16.5%,由于光照强度变化、光伏性能衰减及同时率等原因,光伏最高出力仅占用电负荷的9.87%。若假设2022年迎峰度夏期间江苏全省光伏总装机增加2 000万kW,按照最高60%的出力测算,将增加电力供应1 200万kW,将能够完全满足2022年有序用电错峰需求。在当前负荷水平下,光伏装机增加2 000万kW,尚未导致午间负荷深度下探,随着后续负荷和光伏装机的同步增长,光伏对日间高峰的顶峰能力以及对电网的正调峰效果将进一步增强。

3.2 光伏发电参与电力平衡计算步骤

考虑光伏可信容量支撑的电力平衡计算可概括为3个步骤。① 结合电力系统负荷需求与不同电源装机容量,进行系统负荷备用、事故备用及机

组检修安排。② 在备用及机组检修合理安排的基础上,在一定时间尺度内(月、旬或周)结合系统需求及电力平衡确定各类电源的工作容量,其中光伏发电工作容量按上述可信容量值进行确定。③ 在光伏电源可信容量的基础上进行电力平衡计算,主要是在满足各时段电力平衡的前提下,支撑电源与光伏发电的互补模拟计算。

3.3 光伏参与电力平衡成效分析

由于光伏发电昼发夜停的特性,在实际电力平衡中更容易受到忽视。在实际电网规划阶段,各省份对于新能源参与电力平衡的方式存在差别。西北电网最大负荷出现在晚峰,晚高峰期间,光伏基本无出力,不纳入高峰平衡,风电按照95%保证概率下的可信容量参与系统平衡。浙江电网常规做法是将对光伏发电参与平衡支撑的可用容量设置为20%,即认为有80%的装机容量为因光照资源不足的受阻容量^[13]。江苏电网在规划阶段按照典型场景95%概率法统计日高峰时段历史出力,将午峰光伏出力系数为设置在10~15%。2022年夏季,江苏光伏总装机2 130.9万kW,日间高峰期间平均发电出力1 169.7万kW,占光伏总装机容量的54.9%,远超各网省公司设定的午峰光伏发电可用容量。

对江苏夏季典型年份高温期间电力平衡情况进行模拟,考虑气温、供热等因素,燃煤机组和燃气机组按照较理想情况下最大可调出力。按照95%置信水平对典型场景下风光历史出力水平进行统计,夏季高峰风电“极热无风”情况较明显,风电按装机容量10%计入平衡,夏季高峰腰荷光伏按30%计入平衡,晚峰不考虑光伏出力情况。在此假设下,夏季午高峰存在约400万kW电力缺口。若考虑将光伏发电置信容量按照50%考虑,则可以完全抵消午高峰电力缺口,从而可减小系统在午高峰期间调峰成本。

4 结束语

光伏发电是能源行业实现双碳目标的战略举措之一,电网企业也始终将服务新能源发展与消纳作为首要任务。从装机容量上看,我国基本不缺电力装机,只是在高峰、尖峰时段或者极端天气下新能源出力不足时,会出现用电紧张现象。充分利用光伏发电在高温尖峰负荷的稳定出力,能够在规划和运行阶段提高电网经济性。未来10年,新能源开发与煤电转型将配合发展^[14],光伏将与高效火

电、核电、风电等电源共同构建起多元发展的能源结构。

本文通过极端高温天气期间光伏发电的实际运行数据分析,指出极端高温天气负荷通常超出预期,光伏发电出力可预测且相对稳定,光伏能够作为极端高温特殊方式下的电力平衡电源。实际分析也表明,极端高温方式下光伏在日间可信容量较高。当前极端天气频发,有必要在开展电网规划或运行优化时增加极端高温天气特殊场景,提高光伏发电参与峰值平衡的可信容量,减小电网调峰成本。值得注意的是,光伏发展需要灵活性资源的配套建设来弥补其昼发夜停的先天缺陷,光伏配套灵活性资源建设可平衡能源发展过程中的绿色、安全与经济矛盾,除此之外后续可进一步通过电动汽车光伏大发期间有序充电以及光伏发电与其他需求侧响应资源配合等组合形态进一步提高光伏发电可信容量。D

参考文献:

- [1] 国家能源局. “十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. 2021-10-21. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-10/21/c_1310611148.htm.
National Energy Administration. 14 th Five- Year Plan for Renewable Energy Development[EB/OL]. 2021-10-21. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-10/21/c_1310611148.htm.
- [2] 吴剑飞, 卜虎正. 江西省东北部风电光伏出力特性分析比较[J]. 电工技术, 2021(4): 32-33, 40.
WU Jianfei, BU Huzheng. Analysis and comparison of characteristics of wind power photovoltaic output in north-east Jiangxi province[J]. Electric Engineering, 2021(4): 32-33, 40.
- [3] 郑可轲, 牛玉广. 大规模新能源发电基地出力特性研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(9): 2 591-2 598.
ZHENG Keke, NIU Yuguang. Research on renewable power basement output characteristics[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(9): 2 591-2 598.
- [4] 张振宇, 孙晓强, 万筱钟, 等. 基于统计学特征的新能源纳入西北电网备用研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2 047-2 054.
ZHANG Zhenyu, SUN Xiaoqiang, WAN Xiaozhong, et al. Research on reserve of northwest power grid considering renewable energy based on statistical characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2 047-2 054.
- [5] 方鑫, 郭强, 张东霞, 等. 并网光伏电站置信容量评估[J].

- 电网技术, 2012, 36(9): 31-35.
- FANG Xin, GUO Qiang, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation [J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 31-35.
- [6] 丁明, 徐志成, 毕锐, 等. 基于UGF的光伏发电系统可靠性及容量置信度研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(10): 2505-2511.
- DING Ming, XU Zhicheng, BI Rui, et al. Reliability and capacity credit calculation of PV generation system based on UGF algorithm [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2505-2511.
- [7] 王秀丽, 武泽辰, 曲翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 15-21.
- WANG Xiuli, WU Zechen, QU Chong. Reliability and capacity value evaluation of photovoltaic generation systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 15-21.
- [8] 刘家庆, 张弘鹏, 郭希海, 等. 基于SVR残差修正的光伏发电功率预测模型[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 146-151.
- LIU Jiaqing, ZHANG Hongpeng, GUO Xihai, et al. Prediction model of photovoltaic power generation based on SVR residual correction [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 146-151.
- [9] 孙晓强, 张小奇, 张光儒, 等. 考虑跨区直流调峰的新能源参与电力平衡可信容量提升方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 878-886.
- SUN Xiaoqiang, ZHANG Xiaoqi, ZHANG Guangru, et al. Method research of credible capacity improvement with new energy participating in power balance considering cross-regional DC peak shaving [J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 878-886.
- [10] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
- LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [11] 王文静, 李辉, 赵雷, 等. 光伏技术与工程手册[M]. 中国: 机械工业出版社, 2019: 104-106.
- WANG Wenjing, LI Hui, ZHAO Lei, et al. Manual of photovoltaic technology and engineering [M]. China: China Machine Press, 2019: 104-106.
- [12] 孙晓强, 马晓伟, 张小奇, 等. 基于相依关系的新能源功率预测场景生成及调度应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 10-17.
- SUN Xiaoqiang, MA Xiaowei, ZHANG Xiaoqi, et al. Dependence relationship based scenario generation of power prediction for renewable energy and its application in dispatch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 10-17, 41.
- [13] 张思, 杨晓雷, 阙凌燕, 等. 高比例光伏发电对浙江电网电力平衡的影响及应对策略[J]. 浙江电力, 2022, 41(11): 9-16.
- ZHANG Si, YANG Xiaolei, QUE Lingyan, et al. The impact of high-proportion photovoltaic power generation on the power balance of Zhejiang power grid and its countermeasures [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(11): 9-16.
- [14] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- 作者简介:
张韵(2002), 女, 江苏南京人, 本科, 研究方向为电力系统及其自动化。
- (责任编辑 郝 逊)

广告索引

国网(江苏)电力需求侧管理指导中心有限公司 … (封三)

国网江苏电动汽车服务有限公司 …… (封底)