

“双碳”目标下分布式光伏发电技术的研究进展及展望

张珍珍^{*}, 吕清泉, 张健美

(国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730070)

摘要: 分布式光伏发电具有绿色环保、发电方式灵活、可就地消纳等特点, 随着中国碳达峰、碳中和战略目标的提出和以新能源为主体的新型电力系统的建设, 未来分布式光伏发电将成为新能源大规模发展的重要方向之一。对国内外分布式光伏发电的发展历程进行回顾, 分别从输出功率特性建模和并网运行角度对分布式光伏发电技术发展现状进行分析, 在此基础上对分布式光伏发电未来的关键技术及研究方向进行展望, 并对中国分布式光伏发电未来的发展提出几点建议。

关键词: 分布式光伏发电; 碳达峰; 碳中和; 就地消纳; 发展现状; 技术展望

中图分类号: TM615

文献标志码: A

0 引言

分布式光伏发电系统是指在用户场地附近建设, 运行方式以用户侧“自发自用、余电上网”为主, 且以在配电系统平衡调节为特征的光伏发电设施^[1]。由于分布式光伏发电具有靠近用户侧、位置分散等优势, 能够有效解决中国能源资源与负荷需求分布不一致的问题, 为新能源开发与利用提供良好发展途径, 是中国新能源发展的重点方向之一。

本文对国内外分布式光伏发电的发展历程进行回顾, 分别从输出功率特性建模和并网运行角度对分布式光伏发电技术发展现状进行分析, 在此基础上对其未来的关键技术及研究方向进行展望, 并对碳达峰和碳中和目标(即“双碳”目标)下中国分布式光伏发电未来的发展提出几点建议。

1 分布式光伏发电的发展现状

1.1 发展历程回顾

国外分布式光伏发电起步较早, 早在 1997

年美国就提出了“百万太阳能屋顶”工程, 计划到 2020 年在 100 万个屋顶上建设分布式光伏电站。此外, 由于早期光伏发电的平准化度电成本较高, 发达国家为推进分布式光伏发电的发展, 提出了各种投资补贴政策。德国作为全球推广分布式光伏发电最成功的国家之一, 于 2004 年提出了对光伏发电企业采取由政府补贴 70% 成本费用的政策。新加坡也是大力鼓励光伏发电企业的发展, 于 2011 年提出了不仅由政府补贴 50% 的企业研发资金, 更对进入该国内的光伏发电企业免 10 年税收的利好政策。

中国分布式光伏发电的技术应用较晚, 从 2002 年启动的“送电到乡工程”开始, 一直到 2006 年, 中国分布式光伏发电一直处于初期试点阶段。从 2007 年开始, 中国分布式光伏行业逐渐进入产业化发展阶段: 2008 年启动了“金太阳示范工程”与“光电建筑应用示范工程”, 2009~2012 年, 中国共组织了 4 期“金太阳示范工程”及“光电建筑应用示范工程”的项目招标,

收稿日期: 2021-11-04

基金项目: 甘肃省科技重大专项(19ZD2GA003)

通信作者: 张珍珍(1992—), 女, 硕士、工程师, 主要从事新能源发电系统并网运行控制方面的研究。940328645@qq.com

总装机容量达到 6.6 GW，极大推动了分布式光伏发电的发展；2013 年，国家发展和改革委员会发文，明确要求对实行“自发自用”模式的分布式光伏发电按照发电量提供补贴，补贴标准为 0.42 元 /kWh，此外，各级地方政府也积极出台了与额外补贴相关的政策，由此促进了分布式光伏发电的进一步发展。2016~2020 年，中国分布式光伏发电进入快速发展阶段，其累计装机容量占光伏发电累计装机容量的比重从 13.33% 增长至 31.57%。2016~2020 年中国分布式光伏发电累计装机容量占光伏发电累计装机容量的比例如图 1 所示。

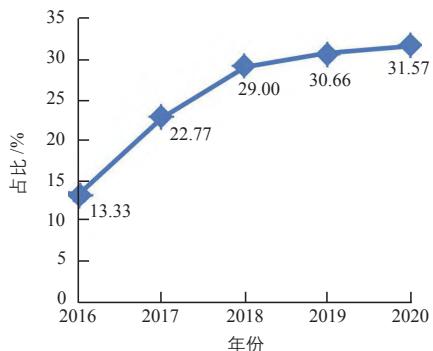


图 1 2016~2020 年中国分布式光伏发电累计装机容量占光伏发电累计装机容量的比例

Fig. 1 Proportion of China's cumulative installed capacity of distributed PV power generation in the cumulative installed capacity of PV power generation from 2016 to 2020

2020 年中国光伏发电新增装机容量为 48.2 GW，其中分布式光伏发电新增装机容量为 15.52 GW，占比高达 32.2%，分布式光伏发电已成为光伏行业的发展重点。

1.2 技术发展现状

分布式光伏发电系统的结构示意图如图 2 所示。受太阳辐照的影响，分布式光伏发电系统的有功功率输出时的平滑可控性较差，主要表现为白天发电、晚上停发，在晚上负荷高峰时无法提供电量；同时云彩的遮挡会导致光伏组件输出功率的急剧下降，秒级最大降幅可达 50% 以上。因此，分布式光伏发电具有间歇性、波动性及随机性的特点。

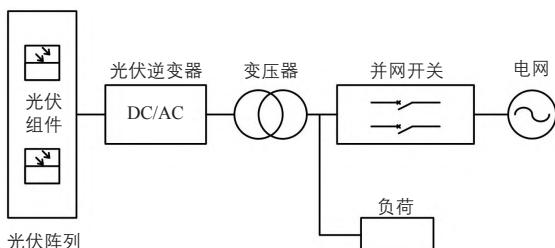


图 2 分布式光伏发电系统的结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of distributed PV power generation system

目前，针对分布式光伏发电输出功率特性建模有两种常用方法。一种方法是不考虑时序特性，建立输出功率的概率分布模型，例如基于贝塔概率密度函数的输出功率模型，此类模型无法给出输出功率随时间变化的特性，一般适用于基于能量平衡的规划研究，无法用于潮流分布、损耗和电压等确定性的计算分析。另一种方法是反映输出功率随时间变化的时序功率模型，可以结合配电网网架及负荷情况，开展潮流计算，得出较为详细的分布式光伏发电并网时对电网损耗、电网电压等方面产生的影响，该方法精确度较高，但获取光伏发电现场小时级历史气象信息的难度较大。

在分布式光伏发电并网运行方面，配电网大多为简单的单电源辐射状供电模式，接入分布式光伏发电后，供电网络将由单电源变成双电源甚至多电源，由此引起馈线潮流的方向和大小发生改变。此外，由于分布式光伏发电系统包括大量的电力电子元件，会对电网造成一定的谐波污染，严重时会影响电网的电能质量。通过对接入配电网的分布式光伏电力进行合理规划，可有效改善配电网电压、降低网络损耗、提高供电可靠性。现有文献对如何改善分布式光伏发电接入对电网的影响做了大量研究。文献 [2] 提出了考虑配电网信息系统可靠性的分布式光伏发电优化配置方法，结果表明：在辐射状配电网中，分布式光伏发电应配置较高的装机容量，并安装于配电网信息系统可靠性较高且靠近变电站的节点处。文献 [3] 以改善电压质量和电网损耗为考量因素，以综合费

用最小为目标建立了分布式光伏发电优化规划模型，结果表明：分布式光伏发电接入农村配电网能有效改善电网损耗高和电压质量低的问题。

2 分布式光伏发电关键技术及研究方向展望

2.1 分布式光伏电站实时全景监测及故障预警技术

分布式光伏电站一般规模较小、分布广、数量多，而且电站之间又相对独立。目前大多数分布式光伏电站主要运行参数（有功功率、无功功率、功率因数等）的监测及地调调度优化处于“盲区”，省调地调无法实时掌握运行状况，随着分布式光伏发电接入量的日益增大，给区域配电网的安全稳定运行带来了非常大的隐患。此外，部分分布式光伏电站因建成投入使用后处于缺乏专业人员监管的状态，面临脱网频发、逆变器故障等运维难题，给电站的运维管理带来严峻挑战，导致发电量大幅下降，影响光伏发电用户的发电效益。因此，为了给分布式光伏发电用户提供运维指导和故障预警，给调度提供监测手段，如何基于电站运行数据和资源监测数据开展分布式光伏电站实时全景监测网络布局，并实现在线故障诊断及预警将成为未来研究的一项关键技术。

2.2 分布式光伏电站－站群发电能力评估技术

准确对分布式光伏电站－站群进行发电能力评估有助于电网调度，能够显著提高光伏发电利用率，提升电站发电效益。现阶段，由于分布式光伏电站位置分散、装机容量小，大多数电站未配置相应的运行监控系统和测光站，不具备数值天气预报功能，无法通过太阳辐照信息、气象数据、运行数据等直接进行发电能力评估。此外，分布式光伏电站发电量和系统效率的影响因素较多，例如气候、光伏组件、逆变器等因素的影响较大，增加了发电能力评估的不确定性和难度，分布式光伏电站发电能力预测处于未知状态，无相应的最大功率点跟踪（MPPT）优化调节，有功功率输出普遍较低，与区域负荷匹配性能较低，且无法参与区域电网调度运行优化。因此，如何

基于相关性分析，提出分布式光伏电站－站群短期、超短期发电能力评估方法和中长期发电量评估方法，并在此基础上建立分布式光伏电站－站群运行优化模型，提供分布式光伏电站逆变器有功无功优化控制策略，提升分布式光伏电站－站群发电能力将成为未来研究的一项关键技术。

2.3 高比例分布式光伏发电接入配电网的优化运行控制技术

高比例分布式光伏发电接入配电网可能引起潮流倒送及电压越限问题，且当前分布式光伏电站无功功率调节能力不足，会出现因天气突变而导致输出功率大幅波动时的较大无功功率缺额，影响并网点及电网电压水平和供电质量。随着分布式光伏发电的快速接入，未来的配电网必须要满足对分布式光伏发电的高度兼容性，需研究的关键技术主要体现在两个方面：1) 如何结合主动配电网，对大量接入的分布式光伏发电进行主动管理，实现长时间尺度下的全局优化控制和短时间尺度下的区域自治控制；2) 如何基于分布式光伏发电并网点电压优化，开展多时间尺度下的配电网有功－无功联合调度，实现协调控制。

2.4 友好型分布式光伏发电综合评价机制

分布式光伏发电作为未来新能源发展的重要方向，在能源转型过程中，必须要考虑与电力系统、其他能源类型、生态环境及用户等各个方面的统筹协调，从粗放式发展过渡到精细化发展，实现分布式光伏电站全生命周期友好性建设，推动能源低碳发展，带动乡村振兴。因此，未来可重点进行友好型分布式光伏发电综合评价机制研究，考虑分布式光伏电站运行参数及并网要求，基于电站可监测、可预测、可控制等目标，建立友好型分布式光伏发电综合评价指标体系，研究计及电站－站群最优发电能力和电网安全稳定运行的分布式光伏发电友好性提升策略。

2.5 计及储能的分布式光伏发电运行模式

分布式光伏发电具有间歇性、强波动性和随机性，大规模分布式光伏发电的发展和并网可能

导致电网安全稳定运行遭受严重威胁。而储能具备良好的调峰调频能力，将其应用于发电侧、电网侧和用户侧，可实现输出功率波动平抑、电网调峰调频辅助服务、电能质量改善、应急备用和无功功率补偿等功能。因此，给分布式光伏电站配置储能，可有效实现削峰填谷，降低高峰负荷压力，提高新能源利用率。未来，可积极推进分布式光伏发电用户侧配置储能的发展模式。此外，随着储能技术成本的不断下降，用户侧利用储能进行调节的经济性已在很多情形下优于供给侧，且优势将越来越明显^[4]。因此，对计及储能的分布式光伏发电运行模式开展研究很有必要，可分别在平抑光伏发电输出功率波动条件下和参与站外优化调度条件下开展“分布式光伏发电+储能”模式的储能选型及最优配置容量的研究，并基于最优发电能力，研究“分布式光伏发电+储能”友好电源的协调优化控制策略，开展“分布式光伏发电+储能”电源友好性分析。

2.6 区域电网源网荷储协调优化运行技术

随着“双碳”目标及乡村振兴战略的提出，分布式光伏发电必将大规模接入配电网。然而，相比于传统优化调度，分布式光伏发电具有的间歇性、随机性、难以准确预测等特点使其接入的区域电网源网荷储协调优化调度发电场景的不确定性更明显，给协调优化运行模型的建立增加了难度。因此，未来可从规模化分布式光伏发电接入的区域电网源网荷储协调优化运行模式方面开展进一步研究，考虑分布式光伏发电多目标场景，开展计及出力置信度的分布式光伏电源负荷平衡能力分析，研究区域电网日前—日内双层调度运行优化策略，研究考虑源荷互动的区域电网源网荷储协调优化运行方法，提出规模化分布式光伏发电接入的区域电网源网荷储协调控制策略。

3 中国分布式光伏发电未来发展的建议

在“双碳”目标指引下，分布式光伏发电将成为推动能源转型的重要抓手。2021年以来，国

家层面、地方层面和行业层面均针对分布式光伏发电的发展先后出台了一系列支持政策。比如，2021年5月，住房和城乡建设部等15个部门发布《关于加强县城绿色低碳建设的意见》(建村[2021]45号)，要求推广分布式光伏发电，提升屋顶光伏发电比例和实施光伏建筑一体化开发；同年7月，国家发展和改革委员会印发《“十四五”循环经济发展规划》，指出要推行分布式能源及“光伏+储能”一体化系统应用。在政策支持持续加强、国内市场不断启动的情况下，中国分布式光伏发电将在“十四五”期间步入新一轮产业化、规模化发展阶段。根据前文总结的发展现状和关键技术研究方向，对中国分布式光伏发电未来发展提出几点建议：

1) 从规模化开发利用角度，目前中国集中式光伏电站主要集中在西部地区，但由于分布过于集中，电网消纳是长期挑战。而分布式光伏电站主要分布在中、东部地区，用电需求大，采用“自发自用、余电上网”模式时，电力基本可全部消纳，不易出现“弃光”现象。因此，可选择主要在中、东部太阳能资源丰富的地区大规模开发建设分布式光伏电站。“十四五”时期，分布式光伏发电的发展模式已由原来的单个项目开发模式，变成多种开发模式，例如2021年推出的整县规模化开发，投资企业建议由原来的以民营企业为主变为以央企、国企为主。

2) 从价格机制角度，2021年6月，国家发展和改革委员会发布《关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知》(发改价格[2021]833号)，要求新备案的工商业分布式光伏发电项目实现平价上网。因此，需要在国家层面继续完善分布式光伏发电上网电价政策的基础上，积极推动各地区制定与当地光照资源禀赋和能源发展需求相适宜的针对性扶持政策，加大分布式光伏发电收益，吸引各方主体投资，支持分布式光伏产业持续健康发展。

3) 从乡村振兴角度，大力发展战略光伏发电不仅能促进农村地区经济发展，更有利于农村

地区用能转型，因此“十四五”期间，靠近电力负荷侧的分布式光伏发电将成为光伏产业发展的方向。未来，可进一步通过开展村级光伏扶贫电站、屋顶分布式光伏发电、“分布式光伏发电+农业”、“分布式光伏发电+种植业”等多种形式的分布式光伏发电应用，充分调动农村资源，提高农民经济收益，优化农村能源结构。

4 结论

本文对国内外分布式光伏发电的发展历程进行了回顾，对分布式光伏发电技术发展现状进行了分析，在此基础上对其未来的关键技术及研究方向进行了展望，并对碳达峰和碳中和目标下中国分布式光伏发电未来发展提出几点建议。总体而言，国内外已开展了分布式光伏发电技术的大量研究和应用，在工程应用等方面日趋成熟，在并网运行和优化配置等方面不断探索。近年来，

分布式光伏发电成为光伏行业的发展重点，得到国家和地方政府的大力支持，而“乡村振兴”战略和碳达峰、碳中和目标的提出，更是给分布式光伏发电带来了广阔的发展前景和机遇。随着分布式光伏电站的大规模接入，其发电能力评估、运行控制、调度策略、源网荷储协调优化运行等技术将成为专家学者研究的重点，对于新能源的发展和构建新型电力系统具有重要意义。

[参考文献]

- [1] 赵恕, 谭再兴. 分布式光伏发电行业研究 [J]. 开发性金融研究, 2015 (4): 66-71.
- [2] 陈晔, 刘宗歧, 常源, 等. 计及配电网信息系统可靠性的分布式光伏优化配置方法 [J]. 可再生能源, 2019, 37(5): 656-663.
- [3] 朱训君, 王宾, 李海雨, 等. 基于改进粒子群算法的农村配电网分布式光伏选址定容研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 206-214.
- [4] 朱敏. 推进“分布式能源+储能”快速健康发展 [N]. 中国经济时报, 2018 (005).

RESEARCH PROGRESS AND PROSPECT OF DISTRIBUTED PV POWER GENERATION TECHNOLOGY UNDER THE GOAL OF EMISSION PEAK AND CARBON NEUTRALITY

Zhang Zhenzhen, Lyu Qingquan, Zhang Jianmei

(State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Distributed PV power generation has the characteristics of green environmental protection, flexible power generation mode, and local consumption. With the proposal of China's emission peak and carbon neutrality strategic goal and the construction of a new power system with new energy as the main body, distributed PV power generation will become one of the important directions for the large-scale development of new energy in the future. This paper reviews the development history of distributed PV power generation at home and abroad, analyzes the development status of distributed PV power generation technology from the perspective of output power characteristic modeling and grid-connected operation, looks forward to the key technologies and research directions of distributed PV power generation in the future, and puts forward several suggestions for the future development of distributed PV power generation in China.

Keywords: distributed PV power generation; emission peak; carbon neutrality; local consumption; development status; technology outlook