

含高渗透率光伏发电负荷预测研究

文/朱文强 林梅芬
福建水利电力职业技术学院

通过对国内及福建省某市的分布式光伏发电现状及发展的调查分析，结合该市电网特点与高渗透率光伏发电的发展，提出进行负荷预测的重要性及如何进行负荷预测的建议。

生活水平的提高对环境保护提出更高的要求，能源需求也越来越大，日益复杂的大电网集中供电方式在运行过程中存在多种困难，分布式电源技术的快速发展和推广，是解决这些困难的重要技术之一。分布式电源对配电网规划带来了巨大影响，福建省某市近年光伏发电容量增幅较大，但仅停留在光伏发电负荷曲线监测阶段，未对高渗透率光伏发电接入系统后可能带来的影响进行认真研究和分析。本文提出负荷预测方案，为未来分布式能源接入电网建立相关预案。

国内分布式光伏发电现状

分布式电源的类型主要有风力发电、太阳能光伏发电、余热发电、生物质能发电及电动汽车储能电池等。党的二十大提出要加强生态环境保护，积极稳妥推进碳达峰、碳中和，加快规划建设新型能源体系，鼓励在工业园区、公共建筑、社区等建筑屋顶安装分布式光伏发电装置。

图1为2018—2022年全国新增电力装机结构对比。2022年新增的各类型发电装机中，七成以上都是非化石能源。风电、光伏发电新增装机规模1.25亿kW，连续三年突破1亿kW，新增分布式光伏历史上首次超过集中式电站。

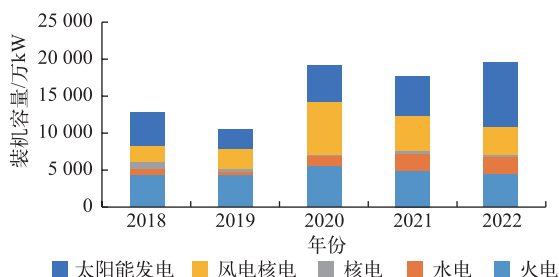


图1 2018—2022年全国新增电力装机结构对比

2017—2022年全国发电量及非化石能源发电占比情况如图2所示。截至2023年4月底，我国光伏发电装机4.4亿kW，风电光伏发电总装机占全国发电装机的30.9%，其中光伏发电占16.6%。2023年1—4月，全国风电光伏发电量达到4 828亿kW·h，同比增长26.8%，占全社会用电量的17.2%，风光发电呈加速发展态势。

福建省“十四五”能源发展专项规划提出，推进分布式园区、厂房、用户屋面光伏等项目，“十四五”期间增加装机300万kW以上。三明地区位于福建省中西北部，属亚热带季风山地气候，夏长冬短，盛行风为东北和东北偏北，响应国家号召积极推进分布式能源发展，结合三明地区某市地理特点，考虑分布式能源时重点采用风光互补发电模式和光伏发电接入模式。

基金项目：2023年度三明市引导性科技项目(项目编号2023-G-42)

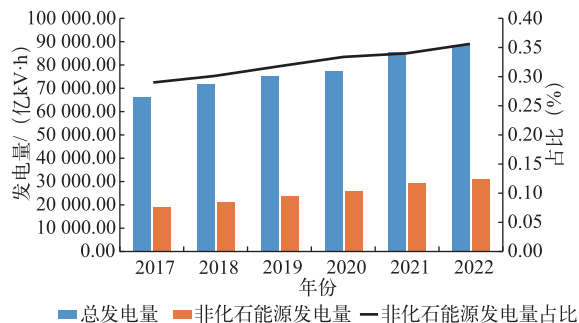


图2 2017—2022年全国发电量及非化石能源发电占比情况

经调查，该市目前已有的清阳新越光伏电站、清阳德力光伏电站、清阳新范光伏电站、清阳日发光伏电站、国电旺丰光伏电站、国电恒晖光伏电站、国电永林光伏电站和国电金德光伏电站等采用10 kV电压上网，还有部分居民、小型厂矿利用自家屋顶装设光伏发电装置发电上网，市政方面装设了光伏发电路灯。

截至2022年底，该市供电面积463.73 km²，用户数21.05万户。2022年全社会最大负荷53.15万kW，同比增长1.86%；全社会用电量34.18亿kW·h，同比下降1.17%；售电量29.69亿kW·h，同比下降1.15%；供电可靠率（RS-3）99.914 3%；110 kV及以下综合线损率2.15%；综合电压合格率99.879%。全市有10 kV公用线路192条，线路长度2 437.74 km，公用配电变压器2 175台，容量89.6万kV·A，环网箱275座。接入10 kV及以下的电源26.97万kW·A，其中分布式光伏装机容量6.79万kW·A。

该市分布式光伏已并网用户数1 215户，主要接入电压等级为10 kV及0.4 kV，累计装机容量为6.77万kW，比2021年增长106.9%。其中户用光伏并网装机容量3.31万kW（占比48.87%），光伏渗透率12.73%，未来渗透率将进一步提升。分布式光伏接入占比如图3所示。

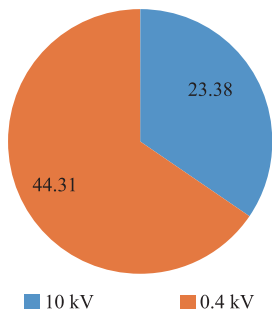


图3 分布式光伏接入占比

新形势下负荷预测的重要性

二十大提出要加强生态环境保护，积极稳妥推进碳达峰碳中和，加快规划建设新型能源体系日显重要，大气污染治理成为一项长期执行政策，为了满足该治理的要求，煤电发电量占比须持续降低，风电、光伏发电等非水可再生能源发电量占比将持续提高，可再生能源发展空间巨大。福建省某市的火力发电目前是该市电力的重要组成部分，为了保护环境，如果调整火力发电，分布式电源的发展将成为趋势。随着风电、光伏发电等电源在电力系统中所占比重的增加，不仅给该市电网调度运行维护带来实质性的影响，也给该市电网规划带来了新的难题和挑战，不确定性和随机性随之显著增加。分布式电源给配电网规划带来的影响主要表现在以下几个方面。

1) 网架变形。由于分布式电源的接入位置和数量不确定，配电网的网架结构发生变形。传统的配电网是由主干干线和支路组成的，而分布式电源的接入加重了支路的负载，可能导致电流不平衡、电压波动等问题。因此，需要对配电网进行重新规划和设计，包括增设变电站、新建配电线路等。

2) 负荷预测的难度增加。风电、光伏发电使电力系统的负荷预测、规划和运行与过去相比更易受天气的影响，具有更大的不确定性出力。由于电网潮流分布的变化，用户可根据电压的分布自行选择分布式电源为其提供电能，电网的负荷增长部分被分布式电源接入抵消，对规划区负荷增长的模型产生影响，电网潮流分布更加难以预测。

3) 智能化控制。分布式电源的接入让配电网需要更加智能化的控制方案。传统的电力系统采用集中控制方式，而分布式电源需要实现分散自治，需要考虑到电量调度、安全监控、数据采集等方面的问题。

现有的负荷预测是通过对历史负荷的分析研究，总结其变化发展规律，用于分析判断未来时刻可能的用电功率、用电量，指导电网功率的优化调度发电功率与发电量，保障供电系统的安全、可靠、经济运行。如何提高负荷预测的准确度是电网规划重点研究的前提，电网负荷预测的准确性直接关系到电网规划质量。由于用户用电需求的突变性及光伏发电受自然条件限制有随机性，要保证电网

系统具有好的供电质量，必须解决功率预测、系统功率优化调度、合理平滑切换以及优控策略等问题。

负荷预测是电网规划设计的基础，能否准确地预测负荷是电网规划的前提条件。与常规能源发电模式不同，光伏发电受地理位置、天气、季节、污染情况等外部因素影响很大，具有周期性、不确定性和不稳定性等特点，加大了负荷分析预判的难度。

至2022年底，该市暂未出现因分布式电源造成反向重载的线路、台区。未来分布式光伏将呈现快速增长，2023—2025年该市年均新增光伏报装容量约3万kW。分布式能源受容量小、间歇性及分散性等特性影响，难以独立加入电力市场运营。虚拟电厂在不改变分布式能源并网方式的前提下，通过不同类型的分布式能源和更高层面的软件构架实现多个分布式能源的协调优化运行，促进系统消纳分布式能源。

提高负荷预测的准确度是电网规划的重要前提，电网负荷预测的准确性直接关系到电网规划质量。截至目前，该市包括三明地区均未对光伏发电接入系统后可能带来的影响进行认真研究和分析，仅停留在光伏发电的负荷曲线监测上，在光伏发电对电力系统产生重大影响之前进行负荷预测方法研究具有重要的现实价值和理论意义。针对高渗透率分布式光伏发电的负荷预测研究不仅是提高电网规划质量的重要前提，也为未来构建虚拟电厂运行模式提供了保障。

负荷预测方案

负荷分析是负荷预测、电网潮流的基础工作之一，是掌握负荷发展规律性的重要手段。负荷分析包括三个方面：负荷特性分析，体现负荷发展变化的外在表象；负荷稳定性分析，体现负荷发展变化的内在规律；气象灵敏度分析，体现负荷受气象因素的影响程度。

负荷预测主要考虑短期负荷预测和超短期负荷预测，本文重点研究短期负荷预测。短期负荷预测应考虑的主要因素包括被预测日类型、气象、社会大事件等，其中被预测日类型指被预测日的星期类型以及是否为节假日；气象因素包括历史气象以及

被预测日预报气象；社会大事件包括重要活动、自然灾害、电网事故等。短期负荷预测过程中应根据以上各种因素，选择适用的预测方法，同时重视专家经验的积累和借鉴。

为解决太阳能发电受季节、天气、地理位置等外部因素影响大，具有周期性、不稳定性 and 不确定性等特点，在预测模型引入Adam算法。Adam是一种可以替代传统随机梯度下降（SGD）过程的一阶优化算法，能基于训练数据迭代地更新神经网络权重。Adam通过计算梯度的一阶矩估计和二阶矩估计为不同的参数设计独立的自适应学习率。这种算法在非稳态和在线问题上性能优越，用在光伏发电接入系统的负荷预测中能提高预测精度。根据光伏发电受天气影响明显的特点，数据处理中根据气象因素进行了三种季节、四种天气的聚类，很好地解决了受气候影响的问题。数据处理上，利用灰色关联分析法分析历史负荷数据、历史气象因素、预测日类型及社会大事件等各数据的相关性，选取相关性较大的数据作为模型的输入量，既保证了输入量的全面性，又极大地减少了输入量个数，提高了神经网络的运行速度。

负荷预测步骤：

- 1) 根据事先了解到的天气信息利用k-均值聚类分析法，将负荷按三种季节（春秋、夏、冬），四种天气（晴、冬云、阴、雨）进行聚类。
- 2) 利用灰色关联分析法分析历史负荷数据、历史气象因素、预测日类型及社会大事件等各数据的相关性，选取相关性较大的数据作为模型的输入量，预测日24 h负荷作为模型的输出量，构成训练数据集并初始化神经网络模型。
- 3) 归一化训练数据集，利用归一化后的数据集与Adam算法训练神经网络模型，得到负荷预测模型。
- 4) 对输出值进行反归一化处理得到被预测日预测值。

结束语

本次负荷预测的研究能应对未来分布式能源的进一步发展，是常态化开展该市分布式能源承载力评估的重要手段，能够为高渗透率分布式能源接入电网建立相关预案。EA