

弹性负荷资源聚合及调节潜力预测技术*

文◆云南电网有限责任公司电网规划建设研究中心 司大军 刘娟

引言

在现代工业转型中，风电、光伏等可再生能源已成为重点发展方向，且新能源已成为发电量增量的核心主体。然而，在实际建设过程中，新能源固有的波动性、间歇性等特点，导致能源浪费问题客观存在。具体来看，当新能源出力不足时，需迅速调用其他电源补充供电以满足负荷需求；若此时未能有效调控引发资源失衡，则会直接造成电力系统震荡。因此，优化电力系统调节机制至关重要。应以工业负荷为关键突破口，通过对其进行系统性整合，构建“虚拟电厂”，从而有效平抑新能源出力波动，全面提升电力系统的运行可靠性。

1 弹性负荷资源聚合技术分析

1.1 聚合意义分析

结合重工业运行实际，其弹

表1 不同负载率下的电动机参数

负载率 (%)	转速 (rpm)
20	1470
40	1450
60	1420
80	1380

性负荷具有显著的分散性特点。在传统电力供应模式下，各类工业负荷缺乏统一的调配与管理机制，导致资源配置效率偏低。工业负荷聚合的核心价值是将分散的工业用电单元进行汇聚整合。一方面，根据不同企业的用电需求与生产特点，为其统一调配电力资源。另一方面，为其制定个性化电力供应方案，从而精准匹配供需，避免资源浪费和闲置。同时，重工业电力系统的安全运行始终是管理重点，而电网实际运行稳定性更是关键环节。当大量工业设备集中启动或停止时，会引发瞬时功率变化，不仅极易引发电网电压波动，还会造成电网故障。因此，需应用合理的调度策略，实时跟踪工业负荷变化情况，将负荷波动幅度控制在最小范围，进而有效缓解电网供电压力，提高整体供电的稳定性^[1]。

1.2 弹性负荷资源聚合方法

从重工业负荷聚合技术领域来看，聚合方法具有多样性特点，基于负载率和临界滑差修正的感应电动机加权聚合便是典型实例之一。结合重工业负荷情况分析，感应电动机是其常用的用电设备。该类设备在运行过程中，实际工作性能会随负载率的变化而产生改变，不同负载率下的电动机参数如表1所示。

在负载率不同时，电动机相应转速、定子电流均会产生差异性，需对不同负载率的感应电动机进行分析，将多个感应电动机聚合，明确反映工业负荷行为，便于电力系统的分析与控制。与传统单纯容量加权法相比，其充分考虑电动机实际运行状态，并引入负载率与临界滑差等关键指标，巧妙考虑感应电动机群中各电动机的运行工况，并对加权系数进行修正，构建针对性弹性负荷资源聚合模型，确保其能够准确反映电动机群的动态特性。在具体实施过程中，一旦感应到电动机负载率较高，则会合理调整加权系数，使其模拟系统实际状态，直观呈现影响情况，为后续电力系统暂态稳定仿真提供技术支撑。同时，需全面收集每台感应电动机的相关参数，如电流、电压、功率等。以功率为例，主要包括负载功率和额定功率^[2]。为实现聚合目标，需科学计算负载率，如式(1)所示。

$$K = \frac{P_{actual}}{P_{rated}} \quad (1)$$

*【基金项目】国家重点研发计划“支撑20%新能源电量占比场景下的电网智能调度关键技术”(2022YFB2403500)，南方电网科技项目“融合安全充裕供电和清洁能源消纳双重目标的新型电力系统规划技术研究及应用”(YNKJXM20230619)

【作者简介】司大军(1976—)，男，山西晋城人，博士，正高级工程师，从事电网分析与电网规划研究工作。

式(1)中, P_{actual} 代表实际负载功率, P_{rated} 代表额定功率, K 代表负载率。

在建立聚合模型过程中, 将所有感应电动机进行聚合, 按照确定的加权系数, 构建等效模型。该种方式能够准确反映感应电机的运行特性, 以便精准预测工业负荷变化。将其应用于重工业企业电力负荷管理中, 能够准确聚合并预测工业负荷情况, 为电网稳定性与可靠性提供保障。

1.3 弹性负荷资源聚合响应可靠性评估

为科学评估弹性负荷资源聚合响应可靠性, 本文以某工业负荷聚合项目为例, 结合企业弹性负荷资源聚合技术应用情况, 分析聚合响应的可靠性、合理性。该项目作为负荷聚合领域的一次成功实践, 主要是通过无线网关与智慧能源单元等技术, 打造“虚拟电厂”。通过加大技术引入力度, 将分散化的低压负荷全面接入虚拟电厂, 提升电网可调能力。数据显示, 先进技术的应用将可调负荷提升至 4000kW。从聚合方式方面来看, 该企业主要是利用生产设备用电负荷可调节的特性, 根据实际需求调整工作参数。本文案例项目为玩具生产企业, 其主要涉及冲压机、注塑机等设备, 通过暂停部分工序、降低生产速度等方式, 能够灵活调节用电负荷。在此基础上, 全面安装智能监测装置, 使其采集设备运行数据, 并将其传输至虚拟电厂进行处理。虚拟电厂则根据企业负荷情况与电网实时需求, 向设备发送相应控制指令, 实现负荷资源的合理分配。该项目的成功实施, 有效提高了电网对负荷波动的应对能力以及电网整体可调能力, 保障电力系统稳定运行。同时, 通过不断调节供电压力, 能够为其带来一定经济效益, 推动节能降耗与降本增效目标的协同落实。总的来说, 根据不同企业生产模式特点, 需应用针对性弹性负荷资源聚合技术, 顺利解决负荷资源分散化的问题, 将其进行集成应用能够增强弹性负荷资源调节方案的个性化、灵活化, 为企业高质量发展助力^[3]。

2 弹性负荷资源调节潜力预测技术分析

2.1 预测原理与价值

在重工业领域, 电力系统稳定运行与优化调度具有积极意义, 对弹性负荷资源调节潜力进行预测至关重要。在具体预测过程中, 主要涉及 4 个方面内容。一是物理模型。对于电动机、空调机组等设备而言, 基于物理模型进行预测, 能够增强调节潜力预测的准确性。不同设备具有一定的物理特性与运行规律, 以设备特点为核心, 建立数学模型能够实时监测各项参数, 确定弹性负荷的调节潜力。二是数据驱动。在现代化背景下, 大量工业设备运行数据得到全面收集、存储, 通过应用深度学习、机器学习等算法, 能够深入挖掘历史数据潜在价值, 明确数据规律, 建立预测模型, 科学评估弹性负荷的调节潜力。以机器学习算法为例, 主要是采用随机森林、决策树等方式, 建立负荷与时间、生产计划等影响因素的关系模型, 准确预测未来负荷的可能变化范围。三是用户行为与生产计划。联合重工业领域生产情况分析, 在预测过程中, 需要综合考量员工工作时间、企业生产安排等因素, 积极与生产管理部门进行数据共享, 获取相应生产计划信息, 以便准确预测弹性负荷的调节潜

力。四是多元信息融合。为提高预测结果的准确性与可参考性, 需注重融合多种信息来源。例如, 在市场电价信息、气象数据中, 以气象数据为例, 主要涉及风速、温度、湿度等指标, 其与工业领域中空调、通风设备等相关负荷具有一定影响。采用关联分析方法, 能够精准预测负荷变化情况, 以便更加全面地评估弹性负荷调节潜力。

对于弹性负荷资源调节潜力预测技术价值而言, 能够提前洞察负荷变化趋势, 为新能源消纳、电力规划等环节提供支撑。新能源消纳作为当前重工业行业面临的主要挑战, 通过预测工业负荷的调节潜力, 能够实现新能源与负荷的有效匹配, 充分消纳多余的新能源电力, 弱化新能源间歇性、随机性风险, 保证电力系统稳定运行, 推动整体能源结构优化升级。

2.2 建立弹性负荷资源调节潜力预测模型

在对工业负荷调节潜力预测期间, 相应方法具有多样性。本文以双向 LSTM 网络预测方法为主, 深入探讨该技术要点, 为实现精准预测提供技术支持。该预测方法作为深度学习领域中的关键部分, 能够提高负荷预测精准性。在实际应用过程中, 双向 LSTM 网络能够打破传统 LSTM 网络的限制, 从正向、反向两个方向入手, 全面处理时间序列数据, 明确数据历史信息与未来发展趋势。双向 LSTM 模型结构如表 2 所示。

结合重工业设备负荷变化情况, 双向 LSTM 网络能够以历史负荷数据为参考, 加强数据处理, 精准推断当前的负荷状

态。同时，反向学习未来数据，对化工企业反应釜负荷数据进行训练与预测，能够更好地理解负荷变化的规律，捕捉负荷在不同生产阶段的变化趋势，降低预测误差。在具体应用中，需以企业生产情况为核心，全面收集弹性负荷相关的历史数据。例如，环境参数、电力消耗等，采用数据清洗、归一化处理等技术，有效保证数据质量。此外，构建双向 LSTM 模型，对预处理后的数据进行划分，使其有效满足后续训练验证以及测试等环节的数据需求。根据实际情况，不断调整模型权重与偏值，最小化预测值与实际值之间的误差。在数据预处理后，需提取与弹性负荷调节潜力相关的特征，并将其输入双向 LSTM 模型中，利用预测技术原理促使模型在传播过程中明确数据特征之间的依赖关系。在此基础上，利用训练好的双向 LSTM 模型进行预测，并与实际值进行比较，提高预测整体准确性。双向 LSTM 网络具有一定建模能力，能够全面捕捉负荷变化趋势与周期性特征，良好适应不同时间尺度的负荷预测需求。作为一种有效预测手段，对于重工业电力负荷管理与电力系统优化具有一定积极意义^[4]。

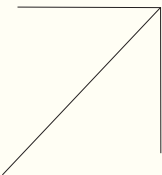


表 2 双向 LSTM 模型结构

结构特征	具体功能
输入层	维度为特征数量、时间步长
双向 LSTM 层	包含多个 LSTM 单元
全连接层	对输出进行线性变换
输出层	输出预测结果

2.3 实例验证

以某工业企业为例，作为汽车制造企业，主要涉及冲压、涂装、焊接等环节，相应设备具有多样性、复杂性特点，在实际生产加工过程中，用电负荷较为复杂且实际波动较大。为保证生产进度达到预期计划，实现对电力资源的优化管理与合理调度，该企业引入负荷预测技术，采用双向 LSTM 网络预测方法，构建相应负荷预测模型。在这期间，全面采集历史负荷、数据设备运行状态以及生产计划等多源数据，为模型准确预测不同生产时段负荷变化提供数据支持。结合企业生产特点分析，每天上午属于生产高峰期。在此阶段，双向 LSTM 网络模型能够提前预测负荷上升情况，根据预测结果向电力调度部门进行预警。从电力调度部门角度来看，需提前调整发电计划，根据生产需求适当增加电力供应，避免因电力不足造成生产中断，提高生产效率。在某一次设备维护过程中，受设备故障因素影响，需将部分设备停机维修。该种情况下，双向 LSTM 网络模型准确预测到负荷将大幅下降，将数据传输至电力调度部门后，及时减少了发电出力，降低用电成本，避免了能源浪费，实现能源管理与电力调度目标。

结语

弹性负荷资源聚合以及调节潜力预测技术能够有效解决当前电力系统运行中的各项问题，增强电网稳定性，全面提高新能源消纳能力。作为工业能源管理领域的创新技术，能够为工业企业实现节能降耗目标。在具体实施过程中，需根据聚合对象，构建聚合模型，科学评估负荷资源聚合响应可靠性。在此基础上，建立调节潜力预测模型，有效突破技术瓶颈，推动工业能源管理的智能化与高效化，为我国工业领域高质量发展提供保障。^[5]

引用

[1] 朱刘宝.考虑源荷双侧弹性资源的电力系统建模与调度优化[D].安徽:合肥工业大学,2023.

[2] 孙晨皓.基于数据驱动的含弹性资源电力系统调度方法研究[D].安徽:合肥工业大学,2023.

[3] 李凡.弹性负荷资源跟踪新能源出力波动的电力交易机制与模式研究[D].西安:陕西理工大学,2022.

[4] 朱程燕,刘永春.基于弹性电网的虚拟电厂平台设计[J].自动化应用,2021(8): 100-103.