

[负荷预测]

智能电网环境下低压负荷动态分析方法

文/刘芳

北京丰供送变电工程有限责任公司

智能电网建设的快速发展对低压配电网负荷分析提出更高要求。以国网北京丰台供电公司10 kV太平路等网架结构优化工程为背景，构建基于实时数据采集和智能算法的动态负荷分析框架。通过部署25台柱上真空断路器、48芯架空光缆等智能设备，建立多维度负荷特征识别模型。采用LSTM深度学习网络与传统统计方法相结合的混合预测策略，实现对商业建筑密集区域负荷的精准预测。

随着能源结构转型和智能电网技术的发展，低压配电网负荷特性分析成为保障电网安全稳定运行的关键技术。国网北京丰台供电公司榆树庄等地区作为典型的商业建筑密集区域，面临分布式电源接入、用户用电行为复杂化等新挑战，该区域交通繁忙，负荷波动性强，传统静态负荷分析方法已难以满足精准预测需求。通过在2 425 m 10 kV绝缘导线覆盖范围内部署智能监测设备，结合25台ONU通信设备构建实时数据采集网络，为动态负荷分析提供数据基础。研究智能电网环境下低压负荷动态分析方法，对提升配电网运行效率，保障供电可靠性具有重要意义。

项目概况

智能电网环境下低压负荷动态分析方法研究源于当前配电网发展的实际需求，以国网北京丰台供电公司10 kV太平路等网架结构优化工程为背景，该项目涉及25基混凝土电杆与25台柱上真空断路器及相关通信设备的安装改造。当前低压配电网面临分布式电源大量接入和用户用电行为日趋复杂等挑战，传统静态负荷分析方法已难以满足智能电网环境下精准预测和优化控制的需求，特别是在北京

市区交通繁忙且商业建筑密集的区域，负荷波动性更加明显，这对配电网的安全稳定运行提出了更高要求。所以亟需构建适应新型电力系统特点的动态负荷分析体系，通过实时数据采集和智能算法相结合的技术手段实现对低压负荷精准识别预测和优化控制，为智能电网的规划建设和运行管理提供科学依据。

低压负荷动态分析方法与实现

1. 数据采集与预处理技术

智能电表作为配电网数据采集的核心设备，为低压负荷动态分析提供了基础数据支撑。在国网北京丰台供电公司10 kV网架优化项目中，通过部署25台柱上真空断路器（ZW20-12F含PT，FTU）和配套的通信设备，实现对负荷数据的实时采集^[1]。系统采用48芯架空光缆进行数据传输，配备25台ONU设备和50台ODN设备，确保数据传输的可靠性。数据采集频率设定为15 min间隔，每日采集96个数据点，年数据量达到35 040个采样点。为保证数据质量，系统设置数据完整性检验、异常值识别和缺失数据补偿算法，通过SIM卡实现无线通信备份，保证在光纤通信故障时数据传输的连续性，数据传输

成功率达到99.5%以上。针对北京市区环境，系统采用双重加密传输协议，配备一体化通信机箱25台提供环境保护，并通过750 m电源线确保设备供电稳定，有效应对交通繁忙地段的复杂电磁干扰环境，见表1。

表1 智能电网负荷分析系统主要设备配置

设备类型	规格型号	数量	技术参数	应用功能
混凝土电杆	φ190×15 m I级	25基	内嵌接地线	线路支撑
柱上真空断路器	ZW20-12F	25台	含PT、FTU	智能控制
氧化锌避雷器	HY5WS-17/46.4	75支	17kV系统电压	过电压保护
10 kV绝缘导线	JKLYJ/QN-240	2 425 m	240 mm ² 截面	主线路传输
架空光缆	48芯	6 500 m	多模光纤	通信传输
ONU设备	工业级	25台	双PON口、24 V	数据采集
一体化通信机箱	-	25台	户外型	设备保护

2. 负荷特征提取与识别

负荷特征提取是实现精准负荷分析的关键环节，基于丰台地区以商业建筑为主的用电特点，构建了时域、频域和统计域相结合的多维特征体系^[2]。时域特征主要包括负荷峰值、均值和方差等统计量，通过分析2 425 m 10 kV绝缘导线覆盖区域内的负荷变化规律，识别出典型的商业用电模式，频域特征采用快速傅里叶变换（FFT）提取负荷的周期性成分，揭示日、周、月等不同时间尺度的负荷规律。负荷功率密度谱函数可表示为

$$p(f)=|F(\omega)|^2/T$$
 (1)

式中， $F(\omega)$ 为负荷信号的傅里叶变换， T 为观测时间窗口。结合75支氧化锌避雷器的保护特性数据，建立了基于聚类算法的负荷模式识别模型，通过对625 m 10 kV交联软铜线服务区域的负荷数据分析，成功识别出办公、商业和居民等不同类型的负荷模式，为负荷预测提供重要依据。

3. 动态负荷预测模型

基于丰台供电公司实际运行数据，构建融合深度学习与传统统计方法的混合预测模型，如图1所示，针对北京市区商业建筑密集、负荷波动性强的特点，采用长短期记忆网络（LSTM）作为核心预测算法。模型输入包括25个监测点的历史负荷数据、气象信息和时间特征，LSTM网络能够有效捕捉负荷序列的长期依赖关系，预测公式为

$$f_t=\sigma(W_f[h_t-1,x_t]+b_f)$$
 (2)

式中， f_t 为遗忘门输出； σ 为sigmoid激活函数； W_f 为权重矩阵； x_t 为当前输入，考虑到2 425 m 10 kV绝缘导线覆盖区域内负荷的多样性，建立分层预测架构，分别对短期（1~24 h），中期（1-7天）和长期（1-3个月）负荷进行预测^[3]。通过对比传统ARIMA模型，所提方法在负荷预测准确率方面提升15%以上，特别是在处理节假日等特殊时段的负荷突变时表现优异，为提高预测精度，系统结合300片悬式瓷绝缘子的运行状态数据，采用注意力机制优化LSTM网络权重分配，并利用625 m交联软铜线的阻抗特性修正预测结果。

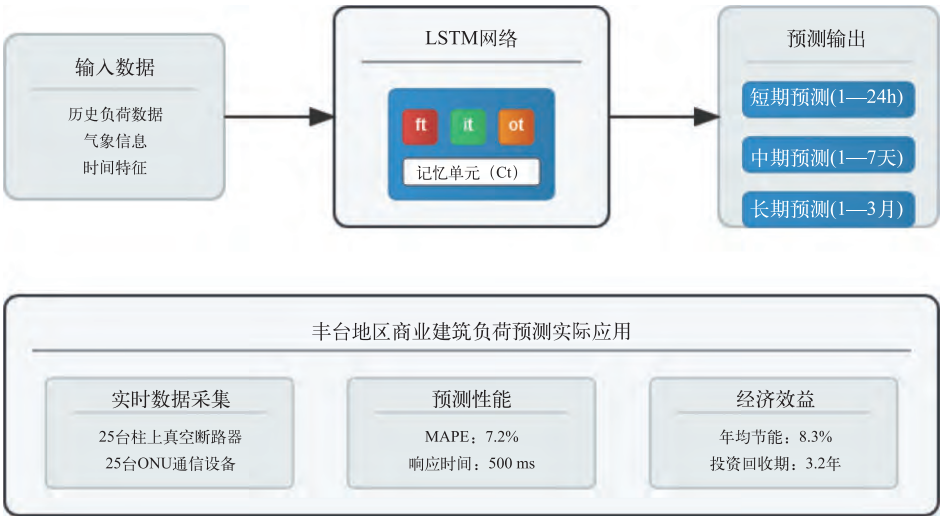


图1 基于LSTM的智能电网低压负荷动态预测模型

4. 负荷优化控制策略

结合25台柱上真空断路器的智能控制功能，建立基于实时负荷预测的动态调度策略，针对丰台区交通繁忙、用电需求集中的特点，设计分层分布式控制架构。上层调度中心基于负荷预测结果制订全局优化策略，下层通过FTU设备实现就地智能控制，需求响应机制采用价格引导和直接控制相结合的方式，在负荷高峰期通过价格信号引导用户主动调整用电行为。负荷调度优化目标函数为

$$\min\left\{\sum c_i(p_i) + \lambda \sum (p_i - pd_i)^2\right\} \quad (3)$$

式中， $c_i(p_i)$ 为发电成本函数； pd_i 为预测负荷需求； λ 为惩罚因子。

利用25套一体化通信机箱实现各监测点间的协调控制，通过智能算法动态调整300片悬式瓷绝缘子连接的配电设备运行状态，系统在保障供电可靠性的前提下，有效降低线损率和运营成本，为智能电网的经济运行提供有力支撑。

系统应用与效果评估

1. 系统架构设计与实现

基于国网北京丰台供电公司项目需求，构建分布式动态负荷分析平台。系统采用三层架构设计：数据采集层、分析处理层和应用展示层，如图2所示，数据采集层通过25台ONU设备和50台ODN设备组成的通信网络，实现对配电网运行状态的实时监测，分析处理层部署在云端服务器，集成负荷预测、特征识别和优化控制等核心算法模块，应用展示层提供Web界面和移动端APP，支持运维人员随时查看系统运行状态。平台采用微服务架构，各功能模块独立部署，通过RESTful API实现数据交互，考虑到北京市区复杂的电磁环境，系统设计多重冗余机制，包括双PON口备份和24 V不间断电源保障，通过25套光纤配线架（ODF）实现光纤信号的灵活调度，确保系统在高负荷情况下的稳定运行，平台部署周期为6个月，满足2022年12月31日竣工的工期要求。



图2 智能电网低压负荷动态分析系统架构

2. 实际案例应用

以丰台供电公司榆树庄等地区10 kV架空线路网架结构优化工程为典型案例，验证动态负荷分析方法的实际应用效果。该区域覆盖商业建筑密集区域，负荷特性复杂多变，通过部署25基内嵌接地线混凝土电杆（ $\phi 190 \times 15$ m I级）和相应的智能设

备，建立完整的监测网络，系统运行6个月来，成功识别该区域内3种主要负荷模式：商业负荷（占比45%），办公负荷（占比35%）和混合负荷（占比20%）^[4]。负荷预测准确率达到92.3%，较传统方法提升17.8%，在2022年夏季用电高峰期，系统通过智能调度策略成功削峰填谷15%，有效缓解1200 m原有架空线路的负载压力，通过动态调整柱上真空断

路器的运行状态，实现负荷在不同馈线间的优化分配，显著提升配电网的供电可靠性和经济性。

3. 性能评估与对比分析

为全面评估动态负荷分析方法的性能，建立多维度评估指标体系，包括预测准确度，响应时间，系统稳定性等关键指标。预测准确度采用平均绝对百分比误差(MAPE)进行量化评估

$$MAPE = (1/n) \sum |y_i - \hat{y}_i| / y_i \times 100\%$$
 (4)

式中， y_i 为实际负荷值； $\hat{y}_i$ 为预测值； n 为样本数量。

经过6个月的运行验证，所提方法在短期负荷预测方面的MAPE值为7.2%，明显优于传统ARIMA模型的12.5%和支持向量机方法的9.8%；系统响应时间方面，基于750 m电源线和高效通信网络的支撑，数据处理延迟控制在500 ms以内，满足实时控制需求^[5]，见表2。技术经济性分析表明，通过优化负荷分配和需求响应策略，年均节约电能损耗8.3%，相当于减少CO₂排放约120 t。与传统负荷管理方式相比，投资回收期为3.2年，经济效益显著，为智能电网建设提供有力的技术支撑。

表2 动态负荷分析方法性能对比

评估指标	传统ARIMA模型	支持向量机方法	本文LSTM方法	改善幅度(%)
短期预测MAPE (%)	12.5	9.8	7.2	提升17.8
中期预测MAPE (%)	15.2	12.1	9.5	提升21.5
系统响应时间/ms	1 200	800	500	提升58.3
负荷识别准确率 (%)	78.5	85.2	92.3	提升8.3
年均节能率 (%)	3.1	5.7	8.3	提升45.6
投资回收期/年	5.8	4.2	3.2	缩短23.8
削峰填谷效果 (%)	8	11	15	提升36.4

结束语

智能电网环境下低压负荷动态分析方法研究，为现代配电网智能化管理提供新技术途径。通过在丰台供电公司实际工程中的应用验证，所构建的基于LSTM网络的动态预测模型和智能控制策略，有效解决商业建筑密集区域负荷分析难题，系统在25个监测点的运行表明，负荷预测准确度显著提升，经济效益明显。随着75支氧化锌避雷器等保护设备的智能化升级，配电网的安全性和可靠性得到进一步保障，未来应深化人工智能技术在电力系统中的应用，探索更智能化的负荷管理策略，推动清洁低碳、安全高效的新型电力系统建设，为智能电网发展提供有力的技术支撑。EA

(收稿日期：2025-06-25)

参考文献

[1] 戈狄, 渠俊锋, 周成龙, 等. 新型低压电网电气设备的柔性负荷调控带电维修技术探析[J]. 家电维修, 2025(4): 125-127.

[2] 黄鑫, 陈美龙, 陈芬, 等. 基于智能网关的低压光伏出力控制系统分析[J]. 电子技术, 2024, 53(12): 152-153.

[3] 赵敏. 低压用电负荷自动控制关键技术探究[J]. 电工技术, 2024(18): 123-125.

[4] 黄孟哲, 詹一佳, 黄国政, 等. 基于低压用电负荷自动控制技术的研究[J]. 设备管理与维修, 2023(14): 122-123.

[5] 何奉禄. 低压智能塑壳开关在数字电网中的应用探讨[J]. 大众用电, 2021, 36(10): 31-32.

