
基于用户边缘终端的异常用电实时监测研究

张渊明

摘要: 对用户用电状况进行有效监测对提高用电效率、保障供电部门权益及提高供用电的安全稳定具有重要意义。针对用电异常监测中基于单源信息易误判、效率较低、及无法全面监测用电状况等问题,文中研究了基于用户边缘终端及多源用电信息的异常用电监测系统,通过边缘软硬件系统采集用户用电过程中的实时电压、电流、漏电、温度等多源信息,通过多角度异常判断和对历史用电数据的对比分析实现对用户多种用电异常的就地综合监测。为了检测文中方法在各类异常用电情形下的监测效果,文中在实验环境下对所述方法和系统进行了测试,实验结果表明,所述方法能够实现对用户用电过程中的漏电、负载失衡和窃电等多种异常状态的有效监测。

关键词: 用电监测; 边缘终端; 多源信息; 用电异常

中图分类号: TM933

文献标识码: B

Study on real-time monitoring of anomalies in electricity usage based on user edge terminal

Abstract: Monitoring of electricity usage is important for improving electricity using efficiency, protecting the interests of power supply departments, and ensuring safety and stability of power supply and consumption. Considering the problems of misjudgment, low efficiency, and incomprehensive monitoring in power consumption anomaly detection using single-source information, this paper studies a comprehensive monitoring system based on edge terminal and multi-source information, where edge software and hardware are designed to collect real-time voltage, current, leakage, and temperature data. The system can achieve comprehensive monitoring of user's power consumption anomalies through multi-angle judgment and comparative analysis of historical power consumption data. Experimental results show that the proposed method can effectively monitor multiple abnormal states like power leakage, load imbalance, electricity theft, etc.

Keywords: monitoring of electricity usage, edge terminal, multi-source information, power use anomaly

0 引言

电力系统终端用户用电设备种类日益增多,用电复杂性不断增强^[1-2],准确掌握用电状况有助于用户了解用电设备的工作状态并制定合理的用电计划^[3]及供电部门了解区域电力负荷发展趋势,提高供电管理效率^[4]。此外,对用电的有效监测有助于电力部门及时发现用户窃电、线路漏电等故障引起的各类用电异常,对规范用户用电、减小损失、提高检修和维护效率以及保障供用电安全具有重要意义^[5-7]。

现有关于用电监测问题已有较多研究,由于相关研究种类繁多且侧重点各有不同,因此,文中将现有用电监测研究大致分为两类。一类是以用户用电数据分析和处理方法为主要研究对象的“软”监测研究,如文献[8]针对用户的异常用电行为监测问题,利用Tensor Flow框架提出采用基于LSTM网络提取用电时间序列的特征,并采用FCN全连接网络进行异常用电检测的方法,文献[9]针对用户的窃电和滥用电等异常用电问题,提出采用K-Means和SVM方法对用户用电行为进行评价,然后利用LSTM模型对用户负荷进行预测并通过设定权重进行评分以实现异常用电的预警,文献[10]针对异常用电识别问题,提出采用改进粒子群算法优化SVM

的核函数参数以构建电能质量扰动模型，用于异常数据的分类，并通过LOF算法计算得到异常因子以判定用电数据是否异常，文献[11]则提出一种基于小波和LSTM网络的混合神经网络模型用于电力用户异常用电模式的检测，文献[12]提出采用基于线性判别分析和密度峰值聚类的双判据无监督模型用于异常用电的检测。另一类则是以用户的实时用电数据作为主要研究对象的“硬”监测研究，如文献[13]采用不同电量检测芯片设计了软、硬件系统用于家庭用电电压、电流和功率的实时监测，文献[14]基于nRF905和GPRS设计了家用电器能耗状态实时监测系统，文献[15]则设计了基于GPRS模块MC55和微控制器LPC2136的经济型用电监测终端。

上述以数据分析和处理方法为主的用电监测研究中通常需要大量的用户用电数据提前进行相关模型的训练，对不同用户往往需要重新训练和调整，适应性较弱且对计算设备性能有一定要求，同时由于缺乏数据积累而难以用于新用户；而以用电相关物理量实时监测为主的研究则通常针对单一的窃电、漏电等特定用电异常问题，通用性和扩展性较弱。针对上述问题，文中采用边缘软硬件终端对用户用电状态进行实时监测和数据分析处理，以降低对于历史用电数据和集中式高性能计算平台的依赖，同时基于电压、电流、漏电流、温度等多种采样终端所采集的用户多源用电信息对多种异常用电情形进行判断，以实现用户对用电状况的综合监测。

1 基于用户边缘终端的用电监测系统

文中所述基于用户边缘终端的用电监测系统如图1所示，系统主要由电力用户、边缘终端用电监测系统和云端监控平台组成，具体工作流程如下：

边缘终端首先通过电压、电流、漏电流和温度等检测单元实时采集用户（工商业建筑、医院和住宅等）的用电情况，然后利用边缘采集单元对所采集的电压、电流等实时用电数据进行初步处理和AD转换后，送入边缘分析计算单元，以对用户的用电状态进行实时分析和判断。用户用电异常状况主要包括两方面，一方面是电网存在漏电等故障因素，通过对线路漏电检测进行判断，另一方面是用户本身存在不规范用电行为，主要通过是否欠压、是否欠流、功率是否异常、三相电压是否平衡等进行判断。当无异常工况时，进一步通过对比历史同期用电数据以估计用户用电负荷的变化及是否存在电力浪费。最后，所得到的用户用电状况及分析结果经边缘通信终端送入云端监控平台，以供后端系统做出进一步的排查、维护等决策。该系统通过在边缘终端对用户用电数据进行实时采集和就地处理，以提高用电异常监测的时效性和综合监测能力。

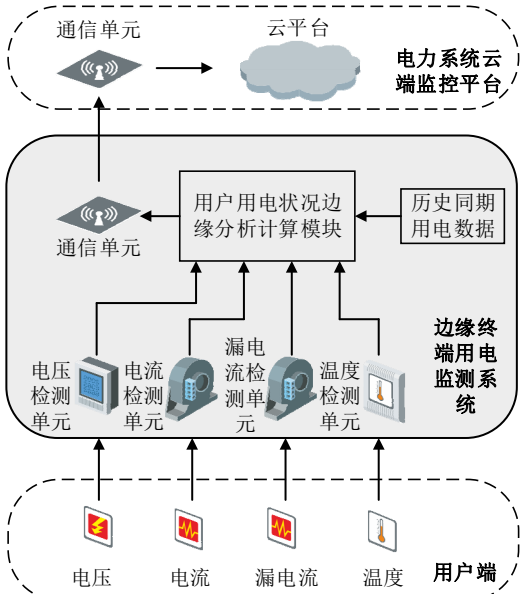


图 1 基于边缘终端多源信息的用电监测系统

Fig.1 Monitoring system of electricity usage based on edge terminal multi-source information

2 系统的主要软硬件组成

文中所述基于多源数据的用电监测系统中边缘终端设备主要由如下取能、电压检测、电流检测、漏电流检测、温度检测和分析计算等单元组成。

2.1 边缘终端硬件设计

2.1.1 边缘取能单元

系统通过取能互感器从入户电缆获取电能，整流滤波后进行隔离稳压输出对边缘终端供电。考虑到用户入户电缆承重能力不同和避免长期使用电缆弯曲形变^[16-17]，取能互感器采用内径可调整的AP-CT-X，取能电源采用AP1220B，主要参数见表1。为便于维护，取能互感器置于单独防水外壳内，取能电源则置于边缘终端计算单元的防水外壳内。

表 1 取能单元 AP1220B 主要参数
Tab.1 Main Parameters of power extraction unit

参数	取值
输出电压	12 V
输出功率	20 W
输出纹波	5‰
模块尺寸	73×126×48 mm
重量	0.6 kg

上述边缘终端供电单元主要原理如图2所示，终端输出的+12 V电压通过TPS54350、TPS5430和TPS54260芯片转换为3.3 V、5 V和3.8 V电压，分别为主控单元STM32F407、电压电流等检测和采集单元和终端4G通信单元EC20模块供电。

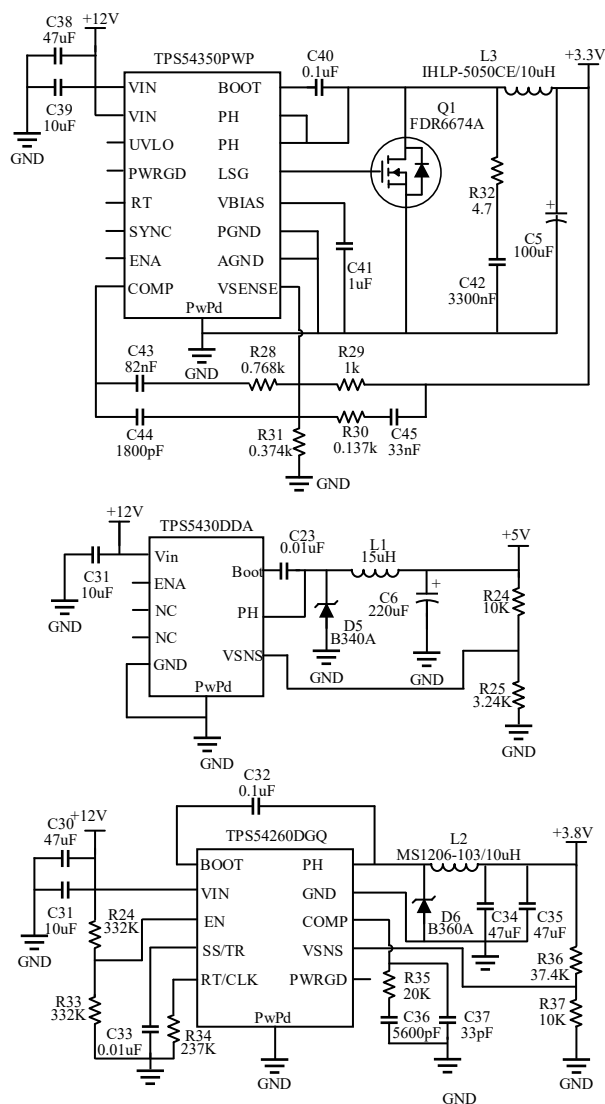


图2 终端供电电路原理

Fig.2 Power supply circuit diagram for terminal units

2.1.2 电压测量单元

边缘终端中电压测量单元用于实时检测用户用电电压大小和相位，测量电路分别如图3和图4所示。图3中测量电压时，首先利用电压互感器ZMPT101对线路电压进行采样，然后经ADC0832模块转换后送入边缘主控单元。图4中相位检测电路用于分析用电相序，三相电压通过二极管和功率电阻被送入PC817光耦进行相位采样，各路光耦在负半周期截止输出高电平，正半周期导通输出低电平，电平信号被送入主控单元，未检测到输出时表明存在缺相故障，而两信号相位差偏离120度较多时表明存在相序问题。

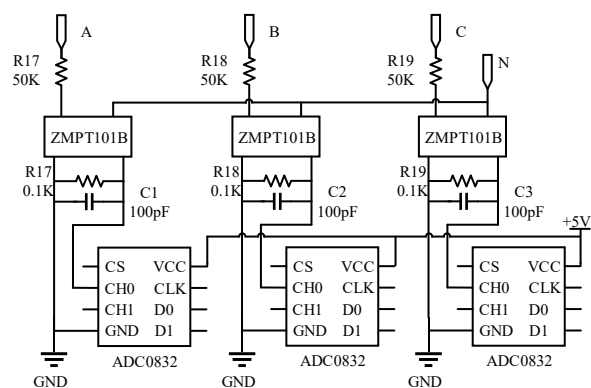


图3 电压测量电路原理

Fig.3 Voltage measuring circuit of electricity users

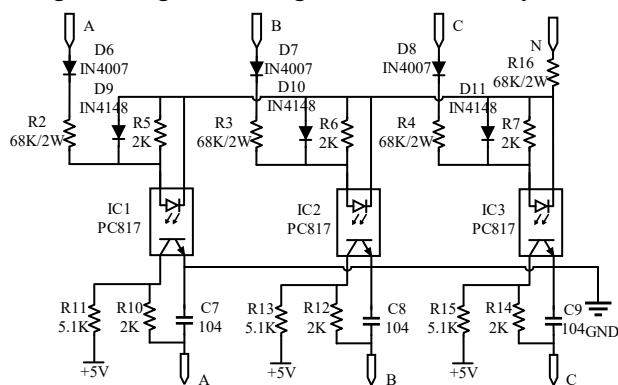


图4 电压相位测量电路原理

Fig.4 Voltage phase measuring circuit diagram

2.1.3 电流测量单元

边缘电流采集单元如图5所示，电流测量主要采用莱姆罗氏线圈，采用双层软磁贴^[18-19]对采集线圈进行电磁屏蔽以降低环境磁场的影响。经罗氏线圈采集到的实时电流信号首先进入OP2177进行放大，电流信号进行恢复后经过模数转换被送入主控芯片STM32F407进行分析计算和判断。

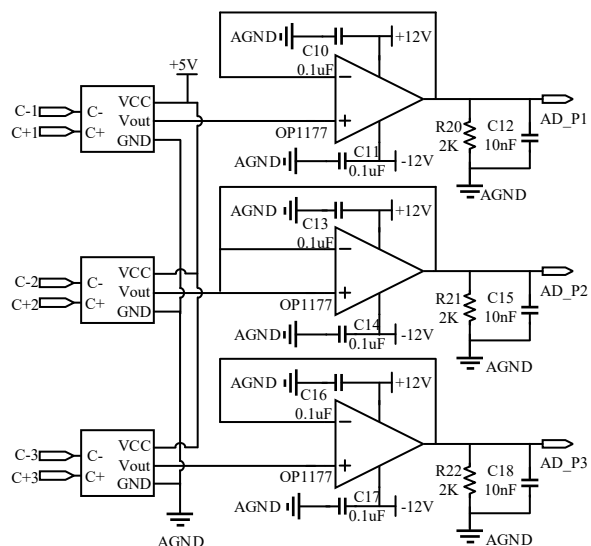


图5 电流测量电路原理

Fig.5 Current measuring circuit diagram

2.1.4 漏电测量单元

漏电流检测主要采用IC54123芯片，内置差分放大器、锁存器和稳压器，具有较高的检测灵敏度和响应速度，检测原理如图6所示。用电正常时，零序互感器电路磁通为零，IC54123无控制信号输出，可控硅SCR关断，脱扣线圈不工作；出现漏电流时，零序互感器检测到电流信号，经IC54123和放大电路输出控制信号触发SCR导通，进而带动电磁脱扣电路使线路跳闸以实现保护用户用电安全的目的。

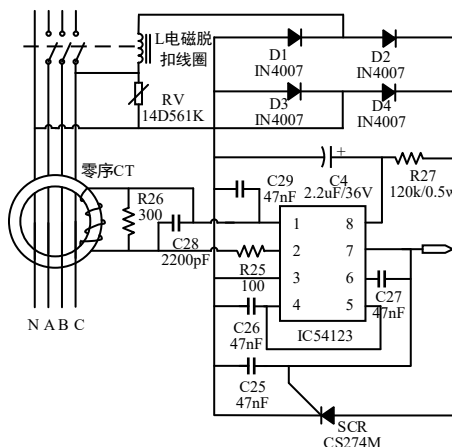


图 6 漏电测量和保护电路原理

Fig.6 Current leak measuring and protecting circuit diagram

2.1.5 温度测量单元和通信单元

空调类负荷通常具有较高的用电占比^[20-21]，因此在边缘终端对用户环境温度检测可以为用户用电情况提供参考，通过对比历史同期数据可对用户用电进行异常判断。文中边缘终端采用DS18B20进行温度检测，该芯片集成了温敏元件和高速缓存，同时具有体积小、精度高和单总线数据传输的特点，通过数据DQ引脚可以方便的读取温度数据。

边缘终端无线通信如图7所示主要采用EC20芯片^[22-23]，该芯片集成了4G通信和定位功能，具有100 Mb/s和50 Mb/s的上、下行速率，可以满足边缘终端用户用电数据的传输需求。该电路主要由主控通信接口和SIM卡接口组成，EC20的UART接口通信电平为1.8 V，需要通过TXS0108芯片进行电平转换后与主控单元进行通信；SIM卡接口电路通过串联22 Ω 电阻以抑制EMI并增强ESD，同时通过33 pF电容减少射频干扰。边缘主控单元输出的用户用电状况数据经过该单元传输至云端监控平台，以为后续分析判断和检修维护决策等提供支持。

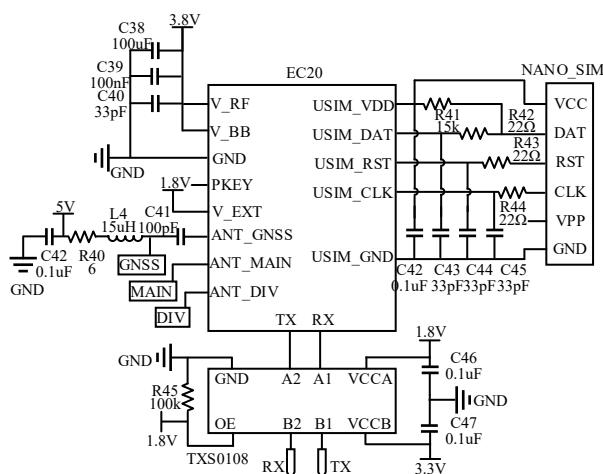


图 7 边缘终端基于 4G 的无线通信

Fig.7 Circuit diagram of wireless communications for edge terminal units based on 4G

2.2 边缘终端用户用电监测系统软件

边缘主控分析计算单元采用STM32F407，主要功能是基于前述多源信息进行综合的用电分析和判断[24-28]，流程如图8所示，主要步骤如下：

(1) 将终端采集到用户实时三相电压 $U_{(A, B, C)}$ 、电流 $I_{(A, B, C)}$ 、电压相角 $\varphi_{(A, B, C)}$ 、温度 T 、功率 P_r 和漏电流 $S(I_{leak})$ 信号及从云端通过入户电表获取的供电三相电压 $U_{r, (A, B, C)}$ 和电流 $I_{r, (A, B, C)}$ 和功率 P_r 信号后送入STM32F407的缓冲区。

(2) 漏电流检测：从缓冲区读取 $S(I_{leak})$ 判断用户用电设备或线路是否存在漏电流， $S(I_{leak})$ 为1表示存在漏电流，0正常状态。

(3) 负载失衡/缺相检测：判断三个端口检测到的实时相位差，若满足式(1)相位差约120度，则说明相位正常；若某相检测不到方波信号，则说明存在缺相；若检测到三相信号，但不满足式(1)，则存在相序错误。通过电压相角信号 $\varphi_{(A, B, C)}$ 即可判断用户用电设备是否存在缺相和用电失衡等故障。

$$\begin{cases} |\varphi_A - \varphi_B| \approx 120^\circ \\ |\varphi_B - \varphi_C| \approx 120^\circ \\ |\varphi_C - \varphi_A| \approx 120^\circ \end{cases} \quad (1)$$

(4) 欠压和欠流检测：对 $U_{(a, b, c)}$ 、 $U_{r, (a, b, c)}$ 和 $I_{(a, b, c)}$ 、 $I_{r, (a, b, c)}$ 进行对比，若某相满足式(2)，则可能存在欠压窃电导致的用电异常；若满足式(3)，则可能存在欠流窃电等导致的用电异常。

$$U_{(A, B, C)} / U_{r, (A, B, C)} > 1 \quad (2)$$

$$I_{(A, B, C)} / I_{r, (A, B, C)} > 1 \quad (3)$$

(5) 移相窃电检测：计算用户用电功率因数，若满足式(4)，则可能存在移相窃电等导致的用电异常。

$$\frac{P}{\sqrt{3}UI} > \frac{P_r}{\sqrt{3}U_r I_r} \quad (4)$$

(6) 功率异常检测：若不存在上述异常，则对比实时功率和电表功率，若满足式(5)，则可能存在括差窃电或其它故障导致的用电异常。

$$P > P_r \quad (5)$$

(7) 历史用电对比：当用户不存在窃电行为导致的用电异常时，进一步对比当前环境温度下的用电数据和历史同期用电数据以及环比日前用电数据，以判断用户是否存在由于空调等温度调节类高耗能设备造成的用电浪费等行为，进而可为节能减排背景下的用户用电管理等提供决策支持。以作者所在地区的历史平均温度和耗电量为例，同季节环比月平均温度波动不超过5 °C，用电数据偏差波动不超过10%，因此选取温度偏差为±5 °C，相对功率偏差为10%，实践中针对不同用户可依据所在地区历史同期的环境温度波动数据和用户实际用电统计数据进行调整，参考历史同期环境数据和用电数据波动的平均值作为温度偏差和功率偏差设定的依据。通过上述流程，可对用户用电过程中多种异常用电状态进行综合监测。

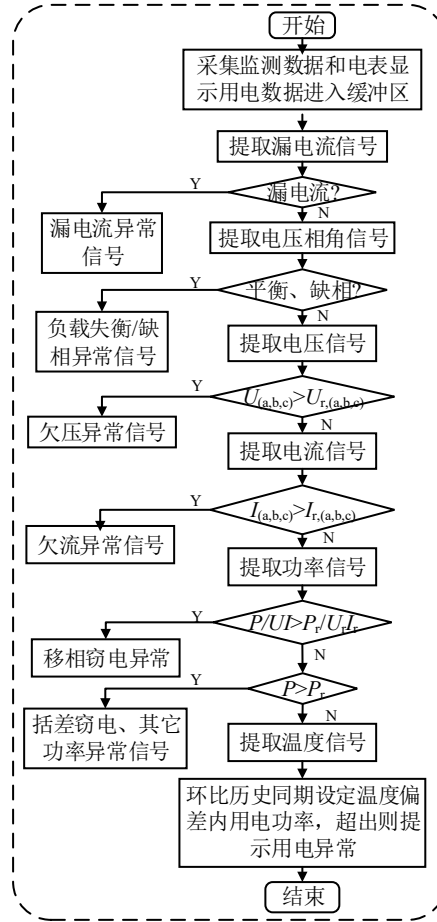


图 8 基于多源信息的用户用电异常监测流程

Fig. 8 Flowchart of abnormality identification of user electricity usage based on multi-source information

3 实验结果

为验证前文所述用电异常监测系统的有效性，分别进行了漏电流、负载失衡、欠压异常、欠流异常和用电功率异常等监测实验，由于现有实际用电环境中上述各类异常用电情形在短时间内难以全部复现，因此文中实验主要在实验环境采用功率源模拟上述异常用电情形。实验中采用三相功率源进行相关异常状况的设置，主要参数如表 2 所示。

表 2 三相功率源 CL303 主要参数

Tab.2 Main Parameters of three-phase power source

参数	取值
输出电压	57.7 V~700 V
输出电流	0.01 A~100 A
输出相位	0°~ 359.99°
输出频率	45 Hz~65 Hz
每相输出容量/电压	100 VA~300 VA
每相输出容量/电流	200 VA~600 VA
电压电流准确度/调节细度	≤0.2% RG/0.01%RG
频率调节细度/准确度	0.001Hz/≤0.01%
相位调节细度/准确度	0.01°/0.5°

漏电流、负载失衡、欠压窃电、欠流窃电和功率异常等监测实验过程参数设置如表 3 所示，相关参数数值的设置主要为模拟各类异常用电情形，为在满足相关异常条件下随机选择的场景，并无特殊含义。其中，漏电流异常测试中功率源设置为三相四线制工作模式，通过在 A 相与零线之间穿过零序 CT 并联 5.1k 的电阻和开关电路来模拟 A 相存在漏电流时的用电情形；负载失衡异常用电监测中功率源设置为三相四线制工作模式，通过将三相中某一相电流设置小于另外两相来模拟负载失衡时的用电情形；欠压窃电异常监测中功率源设置为三相四线制工作模式，通过调整三相电压模拟用户用电欠压的情况。欠流窃电异常监测中功率源设置为三相四线制工作模式，通过在 A 相回路与地线之间接入 0.1 Ω 的电阻模拟欠流窃电的用电异常，同时为了模拟真实线路，在 A 相入线端串联约 0.01 Ω 的电阻；功率异常监测主要对比测试因窃电或其它因素导致功率因数变化而使电能计量无法反映用户真实用电的情况。

表 3 实验设置

Tab.3 Parameters settings of test

实验	参数	相序	相位	取值			
漏电流	$I(A)$	I_A	0°	1	4.5	8	23
		I_B	120°	1	4.5	8	23
		I_C	240°	1	4.5	8	23
负载失衡	$I(A)$	I_A	0°	1	3.2	8	23
		I_B	120°	1	4.5	6.8	23
		I_C	240°	1	4.5	8	20.7
欠压窃电	$U(V)$	U_A	0°	220	200	220	220
		U_B	120°	220	220	190	220
		U_C	240°	220	220	220	180
欠流窃电	$I(A)$	I_A	0°	设置 4.5，入线 4.5，出线 4.1			
功率异常	功率因数	相电压 220 V，相电流 1 A，功率因数为 1 和 0.8，分别表示监测系统测得的用电情况和电表测得的用电情况					

实验结果如下：（1）漏电流异常测试中分别闭合并联电路的开关，监测系统均检测到异常而使负载脱扣并向上位系统输出故障信号；（2）负载失衡异常监测中当三相电流均为 1A 时，系统无异常；当 A、B、C 相电流分别设置为 3.2 A、6.8 A 和 20.7 A 时，监测系统均检测到异常而向上位系统发出负载失衡异常信号；（3）欠压窃电异常监测中当三相电压均为 220 V 时，系统无异常，当 A 相、B 相和 C 相电压分别为 200 V、190 V 和 180 V 时，系统均检测到电压异常而向上位机发出异常信号；（4）欠流窃电异常监测中由于零线电流被接地电阻分流而小于相线电流，系统向上位机发出欠流用电异常信号。（5）当功率因数为 0.8 时，监测系统测得功率大于电表功率，发出用电功率故障异常信号。上述实验结果表明所述监测系统对于漏电流、负载失衡、欠压用电、欠流用电异常和其它用电功率异常等均具有良好的检测效果。

为了进一步验证文中所述方法对各种用电异常状况进行综合监测时的有效性，文中对比了传统的欠压窃电检测方法（方法 1）、欠流窃电检测方法（方法 2）、用电功率异常检测方法（方法 3）和文中所述基于多源信息方法的检测效果。实验过程通过多次随机加入 5 种异常用电状态，以测试各种方法的性能，实验过程分别加入 8 次漏电流异常、5 次负载失衡、10 欠压用电异常、10 次欠流用电异常和 5 次用电功率因数异常，每种异常状态被随机加入并输出故障异常信号后即恢复测试系统为正常状态，以等待检测下一个异常状态。实验结果如表 4 所示，由表 4 可知，方法 1 能够准确检测欠压异常及功率异常，虽然能够检测漏电流、负载失衡及欠流等所导致的功率异常，但无法识别异常的类型；方法 2 能够准确检测欠流异常及功率异常，能够检测漏电流、负载失衡及欠压等所导致的功率异常，无法识别异常的类型；方法 3 能够准确检测漏电流、负载失衡、欠压、欠流等导致的用电功率异常，但无法检测异常的类型；文中方法可以同时检测到 5 类用电异常

状况并向上位机发出异常种类信息。上述实验表明文中所述基于多源信息的用户用电异常监测系统能够更有效的实现对用户用电异常的综合检测。

表 4 异常用电检测效果对比

Tab.4 Comparison of power usage anomaly detection

用电异常	检测效果			
	方法 1	方法 2	方法 3	文中方法
漏电流	0/8	0/8	0/8	8/8
负载失衡	0/5	0/5	0/5	5/5
欠压	10/10	0/10	0/10	10/10
欠流	0/10	10/10	0/10	10/10
功率异常	5/5	5/5	5/5	5/5
总计	15/38	15/38	5/38	38/38

4 结束语

文中针对配电网中用户用电异常监测问题,研究了基于用户边缘终端及多源信息的用电异常综合监测系统,主要内容概括如下:

1) 设计了基于边缘终端的取能、用电信息采集、异常检测和通信等系统;

2) 开发了基于电压、电流、相角和功率因数等的用户异常用电综合监测方法;

3) 所述系统可针对用户用电过程种常见的漏电流异常、负载失衡监测、欠压异常、欠流异常和用电功率异常等进行有效的识别和检测,在针对 5 类异常的 38 次实验中,所述方法相对于单源信息的检测方法能够实现对各类用户用电状况的综合监测。

此外,文中实验过程中电源等的参数设置为理想情形,实际应用中由于用电环境的复杂性,需要考虑各电力用户的实际用电情况。同时,文中系统的论述主要针对三相电力用户,对于单相电力用户,对所述软硬件系统的电压电流采集路数进行适当调整仍可适用。同时,可在用电信息采集单元加入相应的滤波装置以提高边缘信息采集的准确性。后续研究中,可考虑将监测系统与电能计量系统进行结合,以进一步提高系统的集成度和整体的运行效率。

参 考 文 献

- [1] 李柏新,雷才嘉,方兵华,等.基于日负荷指标及改进分布式 K-means 聚类的用户用电规律研究[J].电测与仪表,2023,60(10):101-111.
Li Baixin, Lei Caijia, Fang Binghua, et al. Research on typical electricity consumption characteristics based on daily load index and distributed k-means clustering [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10):101-111.
- [2] 杨铮宇.基于大数据和机器学习的用电异常行为分析系统总体架构[J].电测与仪表,2023,60(6):167-173.
Yang Zhengyu. Overall architecture analysis system of abnormal electricity behavior based on big data and machine learning[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(6):167-173.
- [3] 赵小岗.能源监测系统在棉纺厂错峰用电方面应用研究[J].棉纺织技术,2021,49(3):16-19.
Zhao Xiaogang. Application study of energy inspection system in peak load shifting power utilization of cotton mill [J]. Cotton Textile Technology, 2021,49(3):16-19.
- [4] 孙毅,崔灿,张璐,郝建红,等.智能用电非侵入式负荷监测系统研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):155-160.
Sun Yi, Cui Can, Zhang Lu, et al. Research on nonintrusive load monitoring system for global energy internet [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(2):155-160.
- [5] 陈启鑫,郑可迪,康重庆,等.异常用电的检测方法:评述与展望[J].电力系统自动化,2018,42(17):189-199

-
- Chen Qixin, Zheng Kedi, Kang Chongqing, et al. Detection Methods of Abnormal Electricity Consumption Behaviors: Review and Prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(17):189-199
- [6] 户艳琴,李海明,刘念,等.面向能源互联网终端用户的异常数据检测方法[J].电力建设,2021,42(10):19-27.
- Hu Yanqin, Li Haiming, Liu Nian, et al. Detection Method of Abnormal Data for End Users of Energy Internet [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10):19-27.
- [7] 孙毅,崔灿,张璐,等.智能用电非侵入式负荷监测系统研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):155-160.
- Sun Yi, Cui Can, Zhang Lu, et al. Research on nonintrusive load monitoring system for global energy internet [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(2):155-160.
- [8] 赵文清,沈哲吉,李刚.基于深度学习的用户异常用电模式检测[J].电力自动化设备,2018,38(9):34-38.
- Zhao Wenqing, Shen Zheji, Li Gang. Anomaly detection for power consumption pattern based on deep learning [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(9):34-38.
- [9] 王伟,刘红旗,孙洪昌,等.用电异常行为预警方法[J].哈尔滨理工大学学报,2022,27(4):53-62.
- Wang Wei, Liu Hongqi, Sun Hongchang, et al. Early Warning Method of Abnormal Electricity Consumption Behavior Based on Data Driven [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022,27(4):53-62.
- [10] 黄公跃,付婷婷,林思远,等.用电信息采集系统电能计量数据异常识别研究[J].电网与清洁能源,2023,39(4):25-3046.
- Huang Gongyue, Fu Tingting, Lin Siyuan, et al. A Study on Abnormal Identification of Electric Energy Measurement Data in Electric Energy Information Acquisition System [J]. Power System and Clean Energy, 2023,39(4):25-3046.
- [11] 郑贵林,谢耀.基于小波和长短期记忆混合神经网络的电力用户异常用电模式检测[J].电测与仪表,2022,59(11):120-125146.
- Zheng Guilin, Xie Yao. Anomaly detection for power consumption patterns based on wavelet and LSTM hybrid neural network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022,59(11):120-125146.
- [12] 王建元,张少锋.基于线性判别分析和密度峰值聚类的异常用电模式检测[J].电力系统自动化,2022,46(5):87-95.
- Wang Jianyuan, Zhang Shaofeng. Anomaly Detection for Power Consumption Patterns Based on Linear Discriminant Analysis and Density Peak Clustering [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(5):87-95.
- [13] 谢檬,曹恬恬.虚拟家用电器工作状态监测系统[J].传感器与微系统,2021,40(2):92-94.
- Xie Meng, Cao Tian. Design of working state monitoring system of domestic appliance [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(2): 92-94.
- [14] 董宇,杨强,颜文俊.基于 nRF905 和 GPRS 的智能家居用电监测系统[J].电子技术应用,2012,38(9):78-81.
- Dong Yu, Yang Qiang, Yan Wenjun. Electric quantity monitoring system of smart home based on nRF905 and GPRS [J]. Application of Electronic Technique, 2012,38(9):78-81.
- [15] 王典洪,梁娟,熊月华.基于 MC55 和 LPC2136 的 GPRS 用电监测终端的实现[J].数据采集与处理,2006,21(B12):258-261.
- Wang Dianhong, Liang Juan, Xiong Yuehua. Realization of Electric User Supervision Terminal Based on MC55 and LPC2136 [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2006,21(B12):258-261.
- [16] 于艾清,濮梦燕,王育飞,等.基于改进鲸鱼算法的分布式电源规划方法[J].电测与仪表,2024,61(08):63-69.
- YU Aiqing, PU Mengyan, WANG Yufei, et al. Distributed power generation planning method based on improved whale algorithm[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2024,61(08):63-69.
- [17] 温从众,丁迅,张忠,等.基于离群点算法的在线监测传感器的设计与研究[J].电子测量与仪器学报,2022,36(12):19-27.
- Wen Congzhong, Ding Xun, Zhang Zhong, et al. Design and research of online monitoring sensor based on outlier algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(12):19-27.
- [18] 杨为之,宋坤宇,周力行.罗氏线圈磁屏蔽盒的设计与研究[J].高压电器,2018,54(12):158-164,173.
- Yang Weizhi, Song Kunyu, Zhou Lixing. Design and Research of the Magnetic Shielding Box of the Rogowski Coil [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 158-164, 173.
- [19] 申狄秋,朱明东,王旭峰,等.罗氏线圈电流互感器谐波计量特性研究[J].高压电器,2018,54(6):170-176.

-
- Shen Diqu, Zhu Mingdong, Wang Xufeng, et al. Harmonic Measurement Characteristics of Electronic Current Transformer with Rogowski Coil [J]. High Voltage Apparatus, 2018,54(6):170-176.
- [20] 赵 兵,王增平,孙毅.计及差异化用能需求的集群空调负荷优化控制策略[J].电测与仪表,2021,58(9):22-27.
- Zhao Bing, Wang Zengping, Sun Yi. An Optimal Control Strategy of Cluster Air-Conditioning Loads Considering Differentiated Energy Demand[J].Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(9):22-27.
- [21] 唐陇军,陈子墨,朱兰,等.考虑碳交易的定、变频空调负荷降碳能力研究[J].电测与仪表,2024,61(6):26-35.
- Tang Longjun, Chen Zimo, Zhu Lan, et al. Research on the carbon reduction capacity of fixed and variable frequency air conditioners considering carbon trading [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 26-35.
- [22] 黄永明,郑冲,张证明,等.大规模无线网络移动边缘计算和缓存研究[J].通信学报,2021,42(4):44-61.
- Huang Yongming, Zheng Chong, Zhang Zhengming. Research on mobile edge computing and caching in massive wireless communication network [J]. Journal on Communications, 2021,42(4):44-61.
- [23] 郇永生. 应用于电除尘斩波式高压脉冲电源的研制[D].安徽: 安徽工业大学,2019.
- Gao Yongsheng. Development of Electric Dust Removal Chopper High Voltage Pulse [D]. Anhui: Anhui University of Technology, 2019.
- [24] 林振智,崔雪原,金伟超,等.用户侧窃电检测关键技术[J].电力系统自动化,2022,46(5):188-199.
- Lin Zhenzhi, Cui Xueyuan, Jin Weichao, et al. Key Technologies of Electricity Theft Detection at Consumer Side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(5):188-199.
- [25] 陈曦,宋纯贺,王天然.大范围低压供电区电力消费及窃电规律研究[J].太原理工大学学报,2022,53(1):71-79.
- Chen Xi, Song Chunhe, Wang Tianran. Study on Power Consumption and Stealing Law of Large-Scale Low Voltage Power Supply Area [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022,53(1):71-79.
- [26] 金晟,苏盛,薛阳,等.数据驱动窃电检测方法综述与低误报率研究展望[J].电力系统自动化,2022,46(1):3-14.
- Jin Sheng, Su Sheng, Xue Yang, et al. Review on Data-driven Based Electricity Theft Detection Method and Research Prospect for Low False Positive Rate [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(1):3-14.
- [27] 郑应俊,杨艺宁,舒一飞,等.基于边缘计算的低压用户窃电检测[J].电力系统自动化,2022,46(11):111-120.
- Zheng Yingjun, Yang Yining, Shu Yifei, et al. Electricity Theft Detection for Low-voltage Users Based on Edge Computing [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022,46(11):111-120.
- [28] 吴迪. 基于用电信息采集数据的用电异常检测方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- Wu Di. Sensitivity Research of electricity abnormal detection method based on data of electricity information acquisition [D]. Beijing: Electric Power Automation Equipment, 2019.