DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0067-04

基于负荷特性的户变关系识别算法研究及应用

陈泽涵，张佳欣，王 斌

（海南电网有限责任公司海口供电局，海南 海口 570102）

摘 要：为配电网提出一种基于负荷特性的户变关系识别新方案。针对待识别区域内的每个台区，在远离变压器的供电线上分别接入一个受数字定时器插座控制的大功率三相用电设备，然后在台区用电负荷水平的波谷时段，通过插座的定时供电控制功能让不同台区的大功率用电设备分时段轮流进行工作，同时利用用电信息采集系统收集待识别区域中各用户的智能电表在该时间段内的电压数据，最后通过这些数据的分析来实现对每只用户电表的户变关系识别。理论分析和测试结果表明，与传统技术相比，新方案充分利用了大功率电器在工作时会导致其临近用电设备出现电压降低的物理现象，无须升级即可实现对大量用户电表和变压器之间隶属关系的高准确性识别，适用范围广，经济成本低，具有较高工程应用价值。

关键词：配电网；智能电表；户变关系识别；供电时间控制；采样数据

中图分类号：TP183；TP391　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003-7241(2025)08-0067-04

Identification Algorithm of Users-Transformer Relationship Based on Load Characteristics

CHEN Zehan, ZHANG Jiaxin, WANG Bin

(Haikou Power Supply Bureau of Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570102, China)

Abstract: A new scheme of users-transformer relationship recognition based on high-power electrical equipment is proposed for distribution network. For each station area in the area to be identified, it connects a high-power three-phase electrical equipment controlled by a digital timer socket on the power supply line far from the transformer. Through the timed power supply control function of the socket, the high-power electrical equipment in different station areas can work in turn in different periods. At the same time, the power consumption information acquisition system is used to collect the voltage data of each intelligent meter in the area to be identified in this period of time. Finally, the station area identification of each user meter is realized through the analysis of these data. The theoretical analysis and test results show that, compared with the traditional technology, the new scheme makes full use of the physical phenomenon that the high-power electrical appliances lead to the voltage drop of the nearby electrical equipment when they are working. It can realize the highly accurate station area identification of a large number of user meters without upgrading. It has wide application scope, low economic cost and high engineering application value.

Keywords: distribution network; smart electricity meter; identification of household change relationships; power supply time control; sampling datat

0 引言

中国拥有全球规模最大的低压配电网络[1]，而智能电表作为其中的一种核心设备，其日常运维是管理部门的一项重要工作[2-3]。部分用户电表的台区档案很容易出现错误，而准确的低压台区户变关系是线损精确分析调整的前提，因此户变关系识别技术已成为电网系统的一项关键技术。

户变关系是指用户电表及其用电设备与变压器之间的隶属关系，以载波通信技术为基础的户变关系识别技术正快速发展中[4-6]，但此类技术面临着信号串扰和应用范围有限的困扰。而一些以数学理论和模型为基础的识别技术复杂度高[7-10]，所需数据量较大，不利于实际应用。文献[11]提出了一种基于信道编码理论的户变关系识别技术，但该技术仅限于拥有特殊变压器的台区。因此电网管理部门急需一种兼具通用性和经济性，可对大量电表进行高准确性的户变关系自动识别的技术。

电流较大的大功率电器会导致相同线路上其它设备的电压降低，基于这一负荷特性，本文提出了一种新型户变关系识别方案，其核心思想是在台区负荷的波谷时段，通过数字定时插座让不同台区内大功率用电设备分时段轮流工作，通过对该时段的电压数据进行收集与分析，可实现大规模用户电表的台区归属识别。理论分析与测试结果显示，与传统技术相比，这种方法具有明显优势，新方案算法简单，适用范围广，可以低成本实现大量电表与

收稿日期：2023-12-08

变压器之间隶属关系的高准确性的判断。

1 配电网线路模型

国内配电网都是以台区为基本单位来进行管理和运维的，其中台区是指一个变压器的供电线性所覆盖的范围，而在配电网中普遍采用的三相四线制线路接线方式，具体如图1所示。

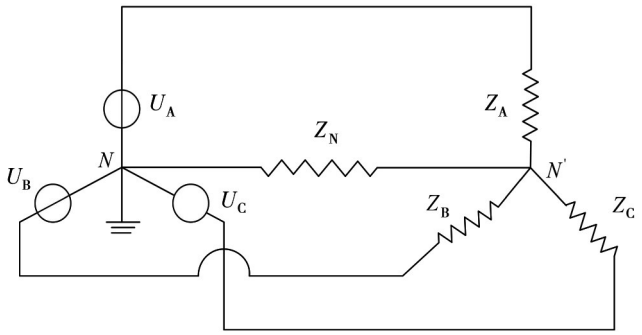


图1 三相四线制线路接线方式

图1中的电源侧中性点N和负荷侧中性点N'之间的电压值$U_{NN'}$与其他参数之间的关系具体为

$$U_{NN'}=\frac{\frac{U_A}{Z_A}+\frac{U_B}{Z_B}+\frac{U_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A}+\frac{1}{Z_B}+\frac{1}{Z_C}+\frac{1}{Z_N}} \tag{1}$$

式中：U_A、U_B和U_C分别为A/B/C三个相位供电线的输出电压/V；Z_A、Z_B和Z_C分别为三个相位供电线的等价负荷阻抗/Ω；Z_N为零线阻抗/Ω。

而图1中的某一个相位供电线路上的电表和用电负荷接线简图如图2所示。

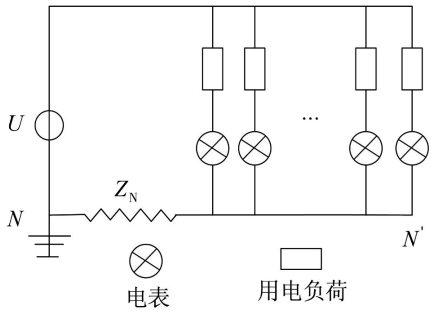


图2 某一个相位供电线路上的电表和用电负荷接线简图

对于单个电表而言，工作电压值的综合影响比较复杂，但从统计的角度出发，在变压器输出电压稳定的情况下，随着台区用电负荷的增加，供电线路上电流值也随之增加，在线路存在一定电阻的情况下，所产生的电压降低值也将随之增加，从而导致线路上所有用电设备的工作电压值也随之下降。

2 户变关系识别方案

户变关系识别的核心在于确定为用户智能电表及其用电设备提供电力的供电变压器。根据台区一些基本运行信息先制定出含$R(R\geqslant 2)$个配电变压器的集合$V=\{V_1,V_2,\cdots,V_R\}$和含Y支智能电表的集合$\Delta=\{\Delta_1,\Delta_2,\cdots,\Delta_Y\}$，其中集合$\Delta$中的每只智能电表都由集合$V$中某个变压器供电，但具体关系无法确定。而户变关系识别的基本模型如图3所示。

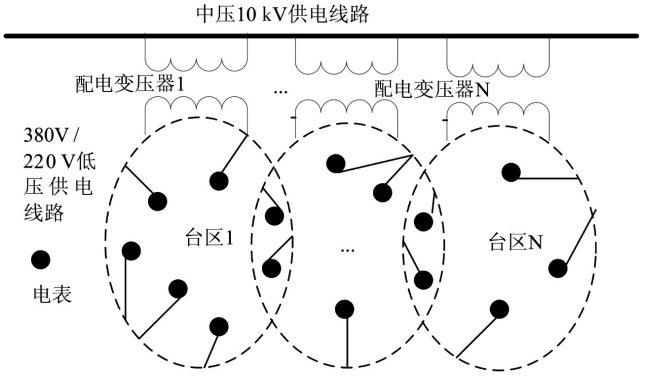


图3 户变关系识别的基本模型

基于上述户变关系识别模型以及供电线路电压降低的物理原理，这里提出了一种新型的基于大功率用电负荷的用户电表和变压器之间隶属关系的识别方案，具体步骤为：

步骤1 管理人员提前选择在R个变压器的远端供电线上各安装一个三相大功率用电设备，编号从1至R，且每个设备都是通过一个可人工配置供电时间的计时器插座连接上供电线路上的，且通过人工方式事先完成了R个用电设备和R个变压器之间的台区隶属关系确定。其中大功率用电设备的选择必须考虑用电安全问题，在保证符合台区用电安全要求的前提下尽量选择较大功率设备以提高电表户变关系识别的准确性。

步骤2 管理人员选择在这些台区用电负荷水平较低的时段，如凌晨，通过人工预配置方式让计时器插座分时段轮流进行供电，从而让R个台区的每个三相大功率用电设备分时段轮流进行工作，而大功率用电设备的工作时段分布情况如图4所示。其中每个设备每次上电工作时间长度为T秒，且一共进行了M次上电工作，即整个识别时间长度为$T\times R\times M$秒。

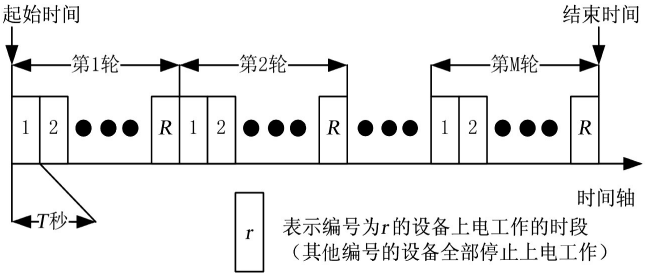


图4 大功率用电设备的工作时段分布情况

步骤3 用电信息采集系统主站通过现有的数据通信

协议，收集 R 个台区中的 Y 只电表的电压采样数据。设每个时段的T秒时间里含 P 个采样数据，一共 $M\times R$ 个时段，则主站点所获得的这 Y 只电表的上报电压数据记为

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdots & d_{1,MR} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdots & d_{2,MR} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{Y,1} & d_{Y,2} & \cdots & d_{Y,MR} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中向量 $\boldsymbol{d}_{ij}=(d_{i,j,1},d_{i,j,2},\cdots,d_{i,j,P})$

步骤4 针对第 $y(1\leqslant y\leqslant Y)$ 只电表的上报数据为

$$\boldsymbol{D}_y=\begin{bmatrix} d_{y,1,1} & d_{y,1,2} & \cdots & d_{y,1,P} \\ d_{y,2,1} & d_{y,2,2} & \cdots & d_{y,2,P} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{y,MR,1} & d_{y,MR,2} & \cdots & d_{y,MR,P} \end{bmatrix} \tag{3}$$

其数据处理过程具体如下：

（1）计算每个时段数据的平均电压值，记为

$$\overline{\boldsymbol{D}}_y=[\overline{D}_{y,1},\overline{D}_{y,2},...,\overline{D}_{y,MR}],\overline{D}_{y,m}=\frac{1}{P}\sum_{p=1}^{P}d_{y,m,p},\quad 1\leqslant m\leqslant MR \tag{4}$$

（2）将上式一共 MR 个数据平均分为 M 段，每段含 R 个数据，记为

$$\mathbf{E}_y=\begin{bmatrix} E_{y,1} \\ E_{y,2} \\ \vdots \\ E_{y,M} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} e_{y,1,1} & e_{y,1,2} & \cdots & e_{y,1,R} \\ e_{y,2,1} & e_{y,2,2} & \cdots & e_{y,2,R} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{y,M,1} & e_{y,M,2} & \cdots & e_{y,M,R} \end{bmatrix} \tag{5}$$

建立一个二元向量 $F_y=[f_{y,1},f_{y,2},\cdots,f_{y,MR}]$，其元素赋值规则为

$$f_{y,mR+k}=\begin{cases}1,if\ e_{y,m+1,k}=\min(\overline{E}_{y,m+1}) \\ 0,\ else\end{cases} \tag{6}$$

$m=0,\cdots,M-1,k=1,\cdots,R$

即将每段 R 个数据中的最小元素所对应的位置的数值置为1，其他位置的数值置为0。

（3）建立如下一个二元矩阵 $\boldsymbol{G}$，即

$$\boldsymbol{G}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{G}_1 \\ \boldsymbol{G}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{G}_R \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & \cdots & g_{1,MR} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & \cdots & g_{2,MR} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{R,1} & g_{R,2} & \cdots & g_{R,MR} \end{bmatrix} \tag{7}$$

分别计算向量和式(7)的 R 个行向量 $\boldsymbol{G}_r=[G_{r,1},G_{r,2},\cdots,G_{r,MR}]$ 之间的内积值 $\boldsymbol{\Omega}_r$，记为

$$\boldsymbol{\Omega}_r=\boldsymbol{F}_y\otimes\boldsymbol{G}_r=\sum_{m=1}^{MR}f_{y,m}\times g_{r,m} \tag{8}$$

（4）最后基于式(8)的 R 个元素数值的大小判决出第 y 只电表与变压器之间的隶属关系，具体为：第 y 值电表和编号为 r 的大功率用电设备归属于同一个供电台区，其中数值 r 表示向量 $\boldsymbol{\Omega}_r$ 中的 R 个数据中的最大元素所对应的位置数值。而事先已经通过人工方式确定了每个大功率用电设备和变压器的台区隶属关系，因此第 y 值电表也隶属于编号为 r 的大功率用电设备所对应的变压器。

从上述的户变关系识别方案内容可以看出，其核心思想是通过具有计时器功能的用电插座，在待识别的各台区中按时段轮流让一个大功率用电设备进行上电工作，从而按预先规划的图案来分时段轮流提高小区的用电负荷水平，增大供电线路上的电流，从而导致各智能电表的供电电压值降低。因此，当主站接收到某电表在此期间的电压采样数据后，则可以通过数据分析出该电表最大概率受到哪个大功率用电负荷的影响，在大功率用电负荷台区关系已知的情况下实现了大量电表的户变关系识别。

在无人工干预的情况下，可以在任意时间轴上选取 R 个时间段，每个时段的平均电压值为 R 个时段平均值的最小值的概率肯定为 $1/R$。但是台区在执行人工预设的大功率用电设备工作计划后，除了原来的随机影响因素外，大功率用电设备工作时所对应的时段的平均电压值会出现一定幅度的下降，从而使得该时段的平均电压值为R个时段平均值的最小值的概率增加，在此情况下，可以通过多轮数据的综合分析，高准确性地识别出电表和变压器之间的台区隶属关系。

3 实验结果与分析

为验证识别算法的准确性，在海口市挑选了3个的相邻城镇居民生活用电台区，其中为节约安装空间，三个变压器使用了背靠背的相邻安装方式。由于该区域属于城乡接合部，供电线路多次进行施工改造，线路布局比较复杂凌乱，且这些台区的供电线路在部分区域存在交叉。电网工作人员通过人工手段完成了上述3个台区共计1，125只电表的户变关系确认，其中台区1包含386只电表，台区2包含411只电表，其余328只电表归属于台区3。

大功率用电负荷选择了3个小区的供水保障系统中的功率为12.5 kW的抽水水泵。其中3台水泵的分时供电图案如图5所示，其中每次水泵的运行时间为 T=1 min，电表电压的采样频率为1 s/次，即一个调压时间段中的电压采样数量为 P=60次，而每个水泵的工作次数一共为 M=32次，因此每次户变关系识别的时间长度为1×3×32=96 min，而测试一共进行了3 d，每天进行了3次。

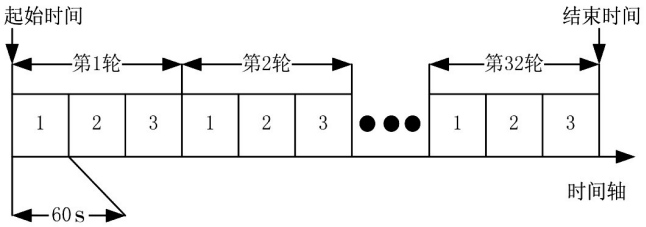
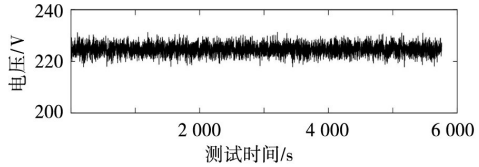


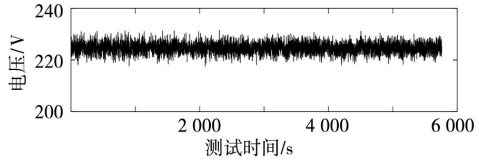
图5 3台水泵的分时供电图案

在某次户变关系识别过程中，分别从3个台区中各随

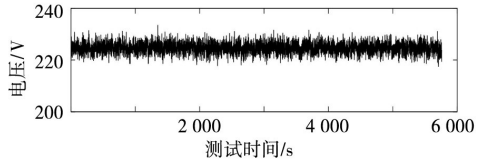
机挑选的1只电表，这三只电表所上报的电压采样数据如图6所示，而三只电表的以分钟为单位的平均电压值如图7所示。



(a) 台区1某电表

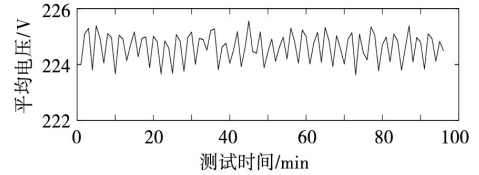


(b) 台区2某电表

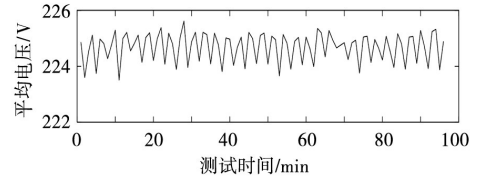


(c) 台区3某电表

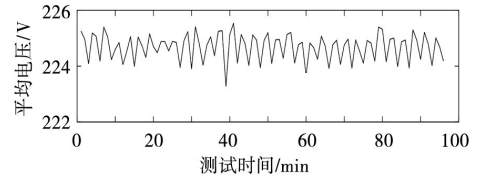
图6 三只电表所上报的电压采样数据



(a) 台区1某电表



(b) 台区2某电表



(c) 台区3某电表

图7 三只电表的以分钟为单位的平均电压

从图6的数据可以看出，由于测试时段的台区用电负荷水平较低，因此电表测的电压值从统计角度上稍微高于220 V的市电供电电压理论值，但满足国家制定的供电质量标准，且瞬时值数据无法看出明显的变化规律。而从图7的数据可以看出，由于3个台区的抽水水泵以1 min为基本时段来轮流进行工作，因此在工作时段对自个台区的电表以分钟为单位的平均电压值产生了幅度约为0.8 V的降压影响。且以3个数据为基本单位进行分析，表1的第1个数据基本上都是3个数据中数值最小的，同理，表2(3)的第2(3)个数据基本上都是3个数据中数值最小，这种较为明显的数据统计特征的差异性显然可以为这3只电表的户变关系识别提供足够充分的判断依据。

最后统计分析了9次测试过程所获得的数据，单次实施识别算法的结果准确性平均值达到了98.4%，而使用9次识别结果进行综合判断后，即1只电表的9次识别结果中如果出现不一致，则取次数最多的结果为最终识别结果，准确性达到了100%。

4 结束语

文中提出了一种基于用电负荷特性的户变关系识别新方法，该方法利用了大功率电器在工作时会导致其临近用电设备出现电压降低的物理现象，通过使用特殊的供电工作图案来对相同供电线路上的电表产生具有一定特征的电压影响，从而实现对区域内大量用户电表和变压器之间隶属关系的自动识别。实验台区测试结果表明，新方案操作过程简单，无需对现有电网信息系统进行任何改造，适用范围广，识别结果具有高准确性，因此具备较高的工程应用价值。

参考文献：

[1] 张瑶，王傲寒，张宏. 中国智能电网发展综述[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(5)：180-187.

[2] 苏慧玲，王忠东，蔡奇新. 智能电能表离散型自动化检定的协同应用[J]. 自动化仪表，2017，38(7)：98-102.

[3] 王登峰，徐文涛，黄吉涛，等. 基于低成本负荷管理的智能电能表研究[J]. 自动化仪表，2022，43(3)：20-25.

[4] 杜晟磊，井含香，石家乐，等. 基于扩频技术的低压电力用户信息自动采集系统[J]. 自动化技术与应用，2023，42(3)：112-116.

[5] 宋玮琼，羡慧竹，李杰，等. 高速载波通信单元台区识别检测系统的设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表，2019(11)：135-137.

[6] 熊学海，万春竹，杨波，等. 继电保护定值模型建立及语义识别技术研究[J]. 自动化技术与应用，2023，42(5)：128-132.

[7] 徐明昕，赵健，王小宇，等. 基于电压聚类和关联卷积的配电网户变关系识别方法[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(4)：92-102.

[8] 杨健，周亚同，刘君. BiLSTM与TCN在户变关系异常识别中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报，2022，34(5)：1-10.

[9] 吴奇，陈相，周昊，等. 基于主成分分析法和改进*K*-means算法的台区用户识别方法[J]. 电气自动化，2020，42(5)：55-57.

[10] 侯慧娟，李梦溪，郭思维. 基于智能电能表微内核动态优先级任务调度方法[J]. 电测与仪表，2023，60(11)：180-187.

[11] 谢映海，张玉. 基于信道编码理论的电表台区识别技术[J]. 物联网学报，2021，5(4)：137-144.

作者简介：陈泽涵(1993—)，男，本科，工程师，经济师，研究方向：电能计量、电气工程。