

基于信道编码理论的电表台区识别技术

谢映海¹, 张玉²

(1. 珠海中慧微电子有限公司博士后站, 广东 珠海 519080; 2. 北京城市学院, 北京 100083)

摘要: 电表的台区识别一直是泛在电力物联网中的一个难题, 建立了一套类似于衰落信道的新分析模型, 并基于有载调容调压配电变压器的远程有载调压功能, 将信道编码理论应用于该难题的解决, 为识别区域中不同台区的智能电表并同步施加不同的具有重复编码和分组编码性质的特殊调压图案, 同时利用用电信息采集系统收集各智能电表在该时间段中的电压数据, 最后基于译码算法的最小距离原则实现对每只电表的台区识别。理论分析和测试结果表明, 和传统技术相比, 新技术无须升级即可在现有电网系统中, 实现对有载调容调压配电变压器台区中大量电表的高准确性台区识别, 具有较高的工程应用价值。

关键词: 泛在电力物联网; 台区识别; 有载调容调压配电变压器; 信道编码; 调压图案

中图分类号: TM933

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00245

Electricity meter area identification technology based on channel coding theory

XIE Yinghai¹, ZHANG Yu²

1. Postdoctoral Station of Zhuhai Zhonghui Microelectronics Co. Ltd., Zhuhai 519080, China

2. Beijing City University, Beijing 100083, China

Abstract: Station area identification has always been a problem in the ubiquitous power Internet of things, a new analytical model similar to fading channel was established for the station area identification, and based on the remote on-load voltage regulation function of on-load capacity and voltage regulation distribution transformer, the channel coding theory was applied to solve the problem. In order to identify station area of the smart meters, different special voltage regulation schemes with the properties of repeated coding and block coding were applied synchronously. At the same time, the power consumption information acquisition system was used to collect the voltage of each smart meter in this period. Finally, the recognition of each meter was realized based on the principle of minimum distance of decoding algorithm. The theoretical analysis and test results show that, compared with the traditional technology, the new technology can realize the high accuracy identification of a large number of meters in the on-load capacity and voltage regulation distribution transformer area in the existing power grid system without upgrading, which has high engineering application value.

Key words: ubiquitous power Internet of things, station area identification, on-load capacity and voltage regulation distribution transformer, channel coding, voltage regulation pattern

1 引言

提升电网的能量利用效率是实现我国碳中和目标的一种重要途径, 其中, 配电变压器是电力系统的末级变压器, 其损耗约占全电网损耗的 20%^[1]。

为提升供电能效, 在国家政策的大力支持下, 电网公司正加快在电网中部署有载调容调压配电变压器^[2], 这是一种新型数字变压器, 可以在有用电负荷或励磁条件下, 通过人工远程控制或按需自主调节进行不同额定容量切换和不同电压分接头间调

整。与传统变压器相比,这种高智能变压器可有效提升负荷波动较大台区的供电能效,也是农村电网低压问题的一种重要解决方法,在节能降耗方面有重大意义^[3-9]。

为提高配电网运维的信息化和智能化水平,国内电力部门正在大力建设泛在电力物联网,而配电网是以台区为基本单位管理和运维的,包括线损计算和窃电监测等^[10],其中,台区是指一个配电变压器的供电覆盖区域,而智能电表作为电网中进行电量计量和用电参数监测的核心设备,也是泛在电力物联网中的一种关键通信节点,其与变压器之间的隶属关系一直是用电管理部门非常关注的工程问题^[11-12]。电表在初始安装时,其台区关系一般比较清晰,但在后续运维过程中,虽然电网公司已经制定了严格的流程,促使相关人员在操作后及时进入系统记录,且也会定期组织人员排查,但配电网系统覆盖区域太广,新的操作每天都在不断发生,包括电力设施的安装、扩容、割接、迁移等,这些都会造成大量电表的台区档案混乱甚至出现错误。

便携式台区识别仪是电网运维过程的一种常用设备^[13],使用过程是一方利用手持设备在已知台区的线路上发送沿电线传输的特殊信号,而另一方在待台区识别设备的供电线路上进行信号接收,如果正确接收则意味着发送方和接收方在同一根线路上,反之则不是。这种方式需要至少两名经验丰富、熟悉环境的人员前往现场带电操作,且每次只能对单个设备进行台区识别,耗时、耗力,成本很高。随着宽带载波通信技术^[14-15]在用电信息采集系统中的广泛应用,考虑到变压器供电域和电力线载波通信域之间具有天然联系,因此基于宽带载波通信过程的台区识别技术正在快速发展中^[16-17]。但受到“背靠背”台区(如图 1 所示)、共零线导致的信号串扰、载波信号跨相传输、同高压侧导致的相邻台区的配电网供电参数趋同、国内部分用电信息采集系统采用非载波通信技术等诸多因素的影响,相关技术在实际台区测试和应用上仍存在较多的问题。还有一些研究人员提出了基于用电参数的大数据分析或神经网络分析的台区识别机制,虽然其不受到用电信息采集系统通信方式的限制,但算法复杂度高,需要进行大量数据的收集和计算分析、对现有系统进行硬件和软件的提升改造,而国内台区数量庞大,用电环境复杂多样,相关算法的适用范围存在一定的局限性^[18-23]。



图 1 云南某 3 个变压器在一起的“背靠背”台区

信道编码是通信领域中的核心技术之一,本文借助有载调容调压配电变压器对台区供电电压的灵活调整能力,建立了一套类似于衰落信道的新分析模型,并将信道纠错编码思想引入台区识别领域,为智能电表提供了一种新型的基于特殊调压图案的台区识别方案。工作人员远程控制变压器在有载情况下同步进行电压档位状态调整,对待识别区域不同台区的智能电表同步施加不同的具有重复编码和分组编码特性的调压图案,其间利用现有用电信息采集系统收集各智能电表的电压数据,最后基于译码理论中的硬判决机制和最小汉明距离原则识别每只电表的台区隶属关系。理论分析和测试结果表明,和传统技术相比,新技术适用于现有所有采用不同类型通信技术的用电信息采集系统,在无须系统升级的情况下,即可通过远程方式短时间内自动实现对大量电表的台区识别,算法复杂度低,识别结果正确性高,经济成本低,具有较高的工程应用价值。

2 基于变压器调压功能的电表台区识别算法

2.1 调压图案的定义

变压器调压是通过改变变压器高压边和低压边绕组的匝比值实现的,一般是保持低压侧绕组匝数不变,变换高压侧绕组分接头改变高压侧匝数,并且分接头的数目越多,电压可调节的范围越大。早期的变压器为无励磁调压,需要在断电的情况下转换调压分接开关档位,但随着有载分接开关技术的完善,可以让变压器在不断电情况下调压,因此可以有效提高电网能量利用效率,所以应用范围正在日益扩大。

有载调压变压器存在自动调压和手动调压模式,当为自动调压模式时,变压器内的控制器可根据自身获取的一些台区用电参数自动进行电压档位调整控制;而在手动调压模式时,控制器可以基于操作员现场人工操作或远程发送的 GSM 短信调压命令进行电压档位调整控制。考虑到电能质量供

电电压允许偏差的要求，其中，电压档位一般设置为3种——+5%档、中间档、和-5%档，对应关系为 S_1 、 S_2 、 S_3 。

下面给出调压图案的具体定义。

在有载情况下，一个配电变压器每 T 秒进行一次电压档位调整，一共实施 M 次调压操作，则在该时间段里的调压图案记为

$$H = [h_1, h_2, \dots, h_M], h_m \in \{S_1, S_2, S_3\}, m = 1, \dots, M \quad (1)$$

而根据变压器变压过程中的法拉第电磁感应定律可知，上述调压图案所对应的变压器高压边和低压边绕组的匝比值向量 N 为

$$N = [n_1, n_2, \dots, n_M], n_m \in \{1.05n, n, 0.95n\}, m = 1, \dots, M \quad (2)$$

其中， n 表示中间档时的变压器高压边和低压边绕组的匝比值，则有

$$n_m = \begin{cases} 1.05n, & \text{若 } h_m = S_1 \\ n, & \text{若 } h_m = S_2, m = 1, \dots, M \\ 0.95n, & \text{若 } h_m = S_3 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 智能电表的电压数值模型

国内配电网普遍采用三相四线制线路供电^[24]，其接线简图如图2所示。其中， U_A 、 U_B 和 U_C 分别为A/B/C 3个相位供电线的输出电压， Z_A 、 Z_B 和 Z_C 分别为3个相位供电线的等价负荷阻抗， Z_N 为零线阻抗，则电源侧中性点 N 和负荷侧中性点 N' 之间的电压值 $U_{NN'}$ 为

$$U_{NN'} = \frac{\frac{U_A}{Z_A} + \frac{U_B}{Z_B} + \frac{U_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_N}} \quad (4)$$

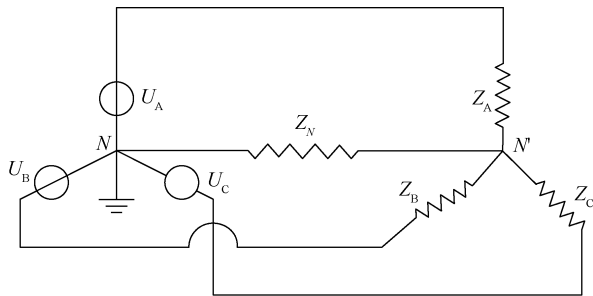


图2 三相四线制线路供电的接线简图

而其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3所示。

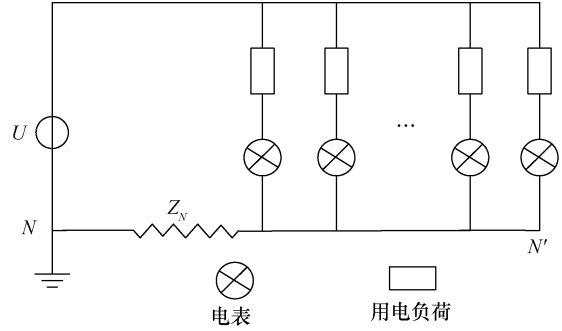


图3 一个相位供电线路上的电表和用电负荷接线简图

因此对某一只电表而言，其工作电压值 $U_{(t)}$ 的大小会受到时变和其他复杂因素共同影响，这里在建模时视其为一个非平稳的随机过程^[25]，具体为

$$U_{(t)} = \lambda_{(t)} K_{(t)} U_{I(t)} + U_{Z(t)} + U_{Z'(t)} + W \quad (5)$$

其中， t 表示时间， $U_{I(t)}$ 表示配电变压器高压侧的输入电压， $K_{(t)}$ 表示变压器高压边和低压边绕组的匝比值，而配电变压器输出电压变化的影响将按不同权重值传递至其供电线路上所有电表的供电电压，且其权重值在不同时间点上可能会产生变化，因此用 $\lambda_{(t)}$ 表示该权重值， $U_{Z(t)}$ 表示该电表所在供电线路上的用电负荷、线路电阻等因素对自身的综合作用数值；而由式(4)可以看出，在零线阻抗无法降低为零的工程现状下，电表的工作电压除受自身线路因素影响外，还会受到其他两个相位的供电线路上用电负荷变化的影响，因此使用 $U_{Z'(t)}$ 表示其他两个相位供电线路中用电负荷、线路电阻等因素对该电表工作电压的综合作用数值；另外由于供电采用交流电，而智能电表的电压值表示的是一个时间区间的有效值而不是瞬间值，因此其数值的获取过程，包括直流采样或交流采样方式，都会存在一定的测量精度误差，这里用 W 表示采样误差值，但该误差值相对稳定，不会随时间产生较大的变动。

2.3 基于调压图案的台区识别等价模型

台区识别问题的本质是确定智能电表所在供电线路对应的供电变压器，而管理人员可根据台区一些基本运行信息先制定出含 R ($R \geq 2$) 个配电变压器的集合 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_R\}$ 和含 Y 支智能电表的集合 $\Delta = \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_Y\}$ ，其中，集合 Δ 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，智能电表的台区归属识别的基本模型如图4所示，因此需要使用某种技术准确识别。

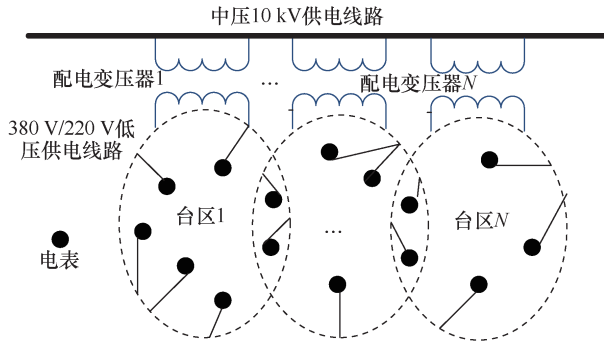


图4 智能电表的台区归属识别的基本模型

基于式(5)可知, 配电变压器的输出电压变化的影响将按不同权重值传递至其供电线路上所有电表的供电电压。为方便理论分析, 将式(5)进一步简化为类似于通信理论中衰落信道模型, 具体为

$$X = \bar{\lambda}E_H + \bar{W} \quad (6)$$

其中, E_H 表示变压器采用调压图案 H 时的输出电压, $\bar{\lambda}$ 表示衰落因子, \bar{W} 表示噪声因子, X 表示电表的工作电压。由于涉及因素众多, 无法对 $\bar{\lambda}$ 和 \bar{W} 因子进行准确建模或测量, 但两者一定满足: $\bar{\lambda}$ 为正向数值, 即变压器升压时, 电表的工作电压在统计意义上会增大, 反之则相反; 而 \bar{W} 和台区的用电负荷水平有较强相关性, 即如果大量用电设备同时工作, 台区的用电负荷水平较高时, 则噪声因子在统计意义上强度会增加, 反之则相反。

基于上述说明, 图4的台区识别问题可以等价于: 在参数 \bar{W} 和参数 $\bar{\lambda}$ 信息仅部分已知的情况下, 不同变压器同步选择不同调压图案来各自实现自身台区输出电压的变化, 从而对智能电表的工作电压数值产生一定程度的影响, 最终通过用电信息采集系统收集这些电压数据, 并分析其数据特征, 据此实现对台区隶属关系的判断。

2.4 基于信道编码理论的台区识别技术

信道编码是通信领域的核心技术, 其基本原理是在待传输的数字信息中引入一定的冗余度, 提高数据在复杂信道中对抗传输衰落和噪声干扰的能力。而重复编码和分组编码是其中比较简单的两种方式, 前者是对待传输数据的多次重复, 后者是将待传输数据映射为另一长度更长、带有特殊数学特性的分组数据。

基于式(6)的模型以及参数 \bar{W} 和参数 $\bar{\lambda}$ 的已知特性, 受信道编码和译码理论的启发, 这里提供了一种基于新型的台区识别技术, 具体方案为:

步骤 1 管理人员选择在台区用电负荷水平较低的时段, 通过远程发送的 GSM 短信调压命令同时对 R 个变压器每 T 秒进行 1 次电压档位调整控制, 一共实施 M 次, 则这 R 个调压图案记为

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,M} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{R,1} & h_{R,2} & \cdots & h_{R,M} \end{bmatrix}, h_{r,m} \in \{S_1, S_2, S_3\} \quad (7)$$

其中, 选择在台区用电负荷水平较低的时段的目的是降低噪声因子的干扰强度, 而这 R 个图案的设计原则具体为:

原则 1 电压档位调整次数 M 必须可以被 3 整除;

原则 2 R 个调压图案中每个图案的第 2、5、8、...、 $M-1$ 次的电压档位必须为 S_2 , 其他 $2M/3$ 次的电压档位则为 S_1 或 S_3 , 即

$$h_{n,y} = S_2, n=1, \dots, N, y=2, 5, 8, \dots, M-1 \quad (8)$$

和

$$h_{n,y} \in \{S_1, S_3\}, n=1, \dots, N, y=1, 3, 4, 6, \dots, M-2, M \quad (9)$$

每 3 次调压过程中, 第 2 次固定为中间档, 而第 1 次和第 3 次为升压或降压档, 这种特殊设计方案的目的是满足对电压数据分析过程的硬判决机制的要求, 即以中间档所处时间的电压采样值为基准阈值, 通过大小对比判断其左右两侧为升压档或降压档。

原则 3 令

$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{1,1} & g_{1,2} & \cdots & g_{1,2M/3} \\ g_{2,1} & g_{2,2} & \cdots & g_{2,2M/3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{R,1} & g_{R,2} & \cdots & g_{R,2M/3} \end{bmatrix}, g_{r,m} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

且满足

$$g_{n,2k-1} = \begin{cases} 1, & \text{若 } h_{n,3k-2} = S_1 \\ 0, & \text{若 } h_{n,3k-2} = S_3 \end{cases}, n=1, \dots, R, k=1, 2, \dots, M/3 \quad (11)$$

和

$$g_{n,2k} = \begin{cases} 1, & \text{若 } h_{n,3k} = S_1 \\ 0, & \text{若 } h_{n,3k} = S_3 \end{cases}, n=1, \dots, R, k=1, 2, \dots, M/3 \quad (12)$$

其中, 0 和 1 表示信道编码中的二进制元素, 则

式(10) G 中的 R 个二进制向量在设计时需要满足分组编码特性, 且为提高台区识别准确性, 彼此之间汉明距离的最小值需要最大化。

步骤 2 用电信息采集系统的主站点使用现有

$$D = \begin{bmatrix} \overbrace{d_{1,1,1}, d_{1,1,2}, \dots, d_{1,1,P}}^{\text{第1个调压档位}}, & \overbrace{d_{1,2,1}, d_{1,2,2}, \dots, d_{1,2,P}}^{\text{第2个调压档位}}, & \dots, & \overbrace{d_{1,M,1}, d_{1,M,2}, \dots, d_{1,M,P}}^{\text{第M个调压档位}} \\ \overbrace{d_{2,1,1}, d_{2,1,2}, \dots, d_{2,1,P}}^{\text{第1个调压档位}}, & \overbrace{d_{2,2,1}, d_{2,2,2}, \dots, d_{2,2,P}}^{\text{第2个调压档位}}, & \dots, & \overbrace{d_{2,M,1}, d_{2,M,2}, \dots, d_{2,M,P}}^{\text{第M个调压档位}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \overbrace{d_{Y,1,1}, d_{Y,1,2}, \dots, d_{Y,1,P}}^{\text{第1个调压档位}}, & \overbrace{d_{Y,2,1}, d_{Y,2,2}, \dots, d_{Y,2,P}}^{\text{第2个调压档位}}, & \dots, & \overbrace{d_{Y,M,1}, d_{Y,M,2}, \dots, d_{Y,M,P}}^{\text{第M个调压档位}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

步骤 3 对第 y ($1 \leq y \leq Y$) 只电表而言, 基于其上报的电压数据

$$D_y = [\overbrace{d_{y,1,1}, d_{y,1,2}, \dots, d_{y,1,P}}^{\text{第1个调压档位}}, \overbrace{d_{y,2,1}, d_{y,2,2}, \dots, d_{y,2,P}}^{\text{第2个调压档位}}, \dots, \overbrace{d_{y,M,1}, d_{y,M,2}, \dots, d_{y,M,P}}^{\text{第M个调压档位}}] \quad (14)$$

其对应的台区识别算法为

1) 计算每个调压档位时间段里的平均电压值, 即有

$$\bar{D}_y = [\bar{D}_{y,1}, \bar{D}_{y,2}, \dots, \bar{D}_{y,M}] = \left[\frac{\sum_{i=1}^P d_{y,1,i}}{P}, \frac{\sum_{i=1}^P d_{y,2,i}}{P}, \dots, \frac{\sum_{i=1}^P d_{y,M,i}}{P} \right] \quad (15)$$

从信道编码的角度上看, 每个调压档位时间段里 P 个电压采样值对应了次数为 P 的重复编码。

2) 由于调压图案需要满足设计原则 2 的要求, 因此这里以中间档位时间段的平均电压值为基准阈值, 对其左右两侧的电压档位进行硬判决, 即 1 个档位时间段的平均电压值如果大于其相邻中间档位时间段的平均电压值, 则该档位为 +5% 档 (升压), 反之则为 -5% 档 (降压)。并对应得到用于分组码译码的二进制判决变量 $\bar{g} = [\bar{g}_{y,1}, \bar{g}_{y,2}, \dots, \bar{g}_{y,2M/3}]$,

具体为

$$\bar{g}_{y,2k-1} = \begin{cases} 1, & \text{若 } \bar{D}_{y,3k-1} > \bar{D}_{y,3k-1} \\ 0, & \text{若 } \bar{D}_{y,3k-1} \leq \bar{D}_{y,3k-1} \end{cases}, k=1, 2, \dots, M/3 \quad (16)$$

和

$$\bar{g}_{y,2k} = \begin{cases} 1, & \text{若 } \bar{D}_{y,3k} > \bar{D}_{y,3k-1} \\ 0, & \text{若 } \bar{D}_{y,3k} \leq \bar{D}_{y,3k-1} \end{cases}, k=1, 2, \dots, M/3 \quad (17)$$

3) 分别计算上述二进制判决变量 $\bar{g} = [\bar{g}_{y,1}, \bar{g}_{y,2}, \dots, \bar{g}_{y,2M/3}]$ 和式(10)的 R 个二进制分组编码向量之间的汉明距离 $\Omega_r, r=1, \dots, R$, 记为

$$\Omega_r = \|\bar{g} - G_r\| = \sqrt{\sum_{m=1}^{2M/3} |\bar{g}_{y,m} - g_{r,m}|^2} \quad (18)$$

通信协议分别收集调压时间段里这 R 个台区中的 Y 只电表的电压采样数据, 不失一般性, 设每次电压档位调整的 T 秒时间里含 P 个采样值, 则主站点所获得的这 Y 只电表的上报电压数据记为

最后基于译码理论的最小汉明距离原则, 判决出第 y 只电表的供电变压器所采用的调压图案, 据此实现该电表的台区识别, 具体为

$$\Phi_{ml} = \arg \max_{G_r \in \{G_1, \dots, G_R\}} \text{pr}(\bar{g} | G_r) = \arg \min_{G_r \in \{G_1, \dots, G_R\}} \|\bar{g} - G_r\| \quad (19)$$

其中, Φ_{ml} 表示最大似然原则; $\arg \max_{G_r \in \{G_1, \dots, G_R\}} \text{pr}(\bar{g} | G_r)$ 表示在已知 \bar{g} 的前提下, 变压器最有可能采用何种调压图案; $\arg \min_{G_r \in \{G_1, \dots, G_R\}} \|\bar{g} - G_r\|$ 表示和 \bar{g} 汉明距离最小的调压图案。

信道编码技术种类繁多, 其中, Turbo、LDPC 和 Polar 等编码因其逼近性能上限而受到关注, 但这些编码技术比较适用于较长的数据, 而本文中台区识别的变压器数量很少, 一般为 2~3 个, 因此只需要采用最简单的重复编码和分组编码技术即可。

3 性能理论分析和台区测试结果

3.1 算法性能理论分析

基于上述台区识别方案内容可以看出, 其核心思想是在有载情况下, 远程同步控制待识别区域的多个变压器进行电压档位切换, 实现变压器输出电压数值的变化, 且不同变压器的调压图案满足特定设计原则以实现不同台区之间的图案差异最大化。而变压器输出电压的变化一定程度上将正向影响其供电线上所有电表的工作电压, 因此主站收到某个电表在该调压期间的电压采样数据后, 可以通过硬判决机制和最小距离机制分析出该电表最大概率受到哪个调压图案的影响, 从而实现台区隶属关

系的识别。

在识别算法性能理论分析方面，两个因素决定了识别结果的正确性，因素 1 是硬判决机制的准确性，因素 2 是式(10)的分组码彼此之间汉明距离的最小值。其中，汉明距离最小值最大化的分组码构造理论已经非常成熟^[26]，这里不再说明；而在因素方面，在变压器没有执行调压方案时，影响电表电压的因素众多且无法预测，则从统计意义上讲，在任意时间轴上选取相邻的两个时间段并计算其平均电压值，则一方数值大于另一方数值的概率肯定为 0.5。但是变压器在执行调压方案后，变压器的调压图案示意图如图 5 所示，除了原来的随机影响因素外，电表电压在相邻时段内会分别受到两个不同的且比较恒定的因素持续影响，因此会出现

$$\text{pr}(\bar{D}_1 > \bar{D}_2 | (S_1, S_2)) > 0.5 \quad (20)$$

和

$$\text{pr}(\bar{D}_3 < \bar{D}_2 | (S_3, S_2)) > 0.5 \quad (21)$$

其中，判决变量 \bar{D}_1 、 \bar{D}_2 和 \bar{D}_3 分别表示升压档位时间段 (S_1)、中间档位时间段 (S_2) 和降压档位时间段 (S_3) 所对应的电表电压平均值。

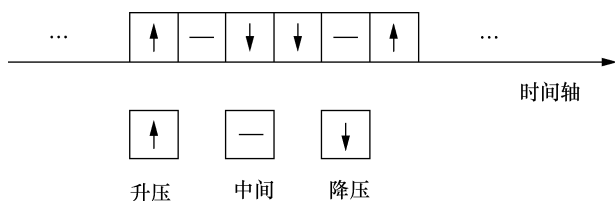


图 5 变压器的调压图案示意图

在此情况下，式(16)和式(17)的二元硬判决变量的正确概率也会大于 0.5，此时基于分组码的检错和纠错性能可知，可以通过扩大分组码的分组长度，即增加调压次数，来增加分组码之间汉明距离的最小值，从而保证识别算法的正确率趋于 1。

3.2 台区测试结果

为验证识别算法的准确性，在云南省电网公司的支持下，在昆明市挑选了 2 个都使用有载调容调压配电变压器的相邻居民生活用电台区，两者的供电线路在部分区域存在交叉情况。先使用人工手段完成了这两个台区的一共 896 只电表的台区识别，其中，421 只电表归属于台区 1，剩余 475 只电表属于台区 2。

测试选择秋季的一周共 7 天进行，此时昆明气温比较凉爽，当地居民基本没有使用空调。为最小

化调压操作对台区供电质量的影响以及降低用电负荷的噪声干扰强度，测试时都选择在凌晨 2:00 开始进行，时间长度为 108 min，其中调压周期 $T=180$ s，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 $P=180$ 次，而调压次数一共为 $M=36$ 次，两个台区的调压图案如图 6 所示。

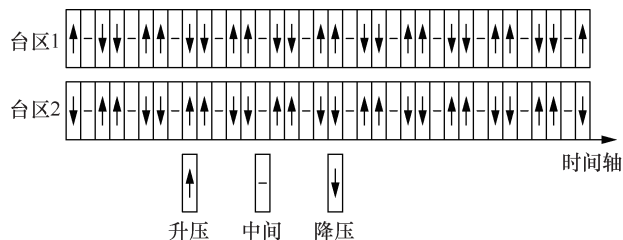


图 6 两个台区的调压图案

上述图案选择将部分相邻调压状态设计为相同的主要目的是减少识别过程的调压操作次数，而在这一周里所得到的 7 次台区识别结果的正确率如图 7 所示。

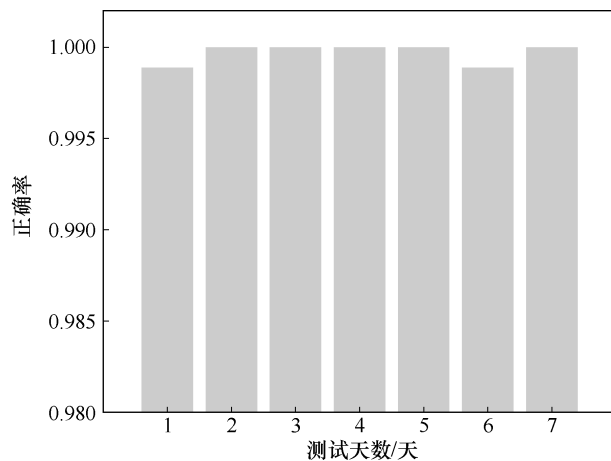


图 7 7 次台区识别结果的正确率

从测试结果上看，在周一和周六的测试时各仅有一只电表出现台区识别错误，其他 5 次测试的结果全部正确。经过人工排查后，出现识别错误的电表为同一支电表，且其安装位置为台区 1 变压器的供电线的远端节点，因此导致变压器侧的电压变化对该电表的影响较弱，从而使得其 7 次识别结果中出现两次误判情况，但这种错误可以通过多次识别来进行修正。

4 结束语

低压配电网是国内覆盖最广的一种重要基础设施，泛在电力物联网是实现电网运营效率提升

的一种方式, 对提高能源利用效率、建设低碳社会具有重要意义。而台区作为其基本管理单位, 电表作为配电网的核心监测设备及泛在电力物联网中的一类关键通信节点, 因此确定大量电表和变压器之间的供电关系一直是具有高度工程价值的问题。考虑到有载调容调压配电变压器在国内电网应用比例的快速增加, 本文利用其远程调压功能, 为台区识别问题建立了一套的新的等价模型, 将信道编码理论引入调压图案的设计过程, 并通过电表电压数据的分析高准确性地识别出其对应变压器所使用的调压图案, 据此确定两者的隶属关系。新技术可适用于采用不同通信技术的用电信息采集系统, 适用范围广, 且其无须对现有电网系统进行任何升级改造, 因此本方案可以迅速在全国各地使用有载调容调压配电变压器的台区中应用, 具有较高的工程应用价值和社会经济价值。

参考文献:

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Y X, LUAN W P. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [2] 国家电网有限公司. 有载调容配电变压器选型导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
State Grid Corporation of China. Selection guidelines for on-load regulation distribution transformers: Q/GDW731-2012[S]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2012.
- [3] MENG Z, PIAO Z L. Design of thyristor valve assembly in on-load automatic capacity regulating distribution transformer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 325/326: 417-423.
- [4] BANGASH K N, FARRAG M E A, OSMAN A H. Smart control of on load tap changer deployed in low voltage distribution network[C]//Proceedings of 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [5] 杨婷婷, 赵玉林, 江志明, 等. 农村电网配电变压器无触点有载自动调容技术研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(10): 239-244.
YANG T T, ZHAO Y L, JIANG Z M, et al. Study on the technology of non contact on-load automatic capacity regulating of the distribution transformer in rural power network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(10): 239-244.
- [6] DENG J Q, ZHANG G G, GENG Y S, et al. Design of intelligent on-load tap changer controlled by permanent magnetic actuator[C]//Proceedings of 2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Piscataway: IEEE Press, 2017: 270-274.
- [7] LUO J J, HU J L, LIU X P, et al. Control strategy study and discussion of on-load capacity regulating transformer[C]//Proceedings of 2015 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA). Piscataway: IEEE Press, 2015: 337-340.
- [8] WANG Y F, ZHAO T F. A hybrid voltage regulator with arcless tap change and stepless voltage regulation functions[C]//Proceedings of 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Piscataway: IEEE Press, 2020: 4857-4863.
- [9] NASIRI B, AHSAN A, GONZALEZ D M, et al. Integration of smart grid technologies for voltage regulation in low voltage distribution grids[C]//Proceedings of 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). Piscataway: IEEE Press, 2016: 954-959.
- [10] 陈洪涛, 蔡慧, 李熊, 等. 基于 k-means 聚类算法的低压台区线损异常辨别方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(2): 2-6.
CHEN H T, CAI H, LI X, et al. Abnormal line loss identification method for low-voltage substation area based on k-means clustering algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(2): 2-6.
- [11] 栾文鹏, 余贻鑫, 王兵. AMI 数据分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 29-36.
LUAN W P, YU Y X, WANG B. AMI data analytics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 29-36.
- [12] 栾文鹏, 赵磊, 王兵, 等. 智能电表数据分析元及示例[J]. 南方电网技术, 2016, 10(1): 1-5.
LUAN W P, ZHAO L, WANG B, et al. Smart meter data analytics and application examples[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(1): 1-5.
- [13] 徐湛. 台区用户识别应用分析[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(11): 26, 28.
XU Z. Application analysis of area users identify apparatus[J]. Metrology & Measurement Technique, 2009, 36(11): 26, 28.
- [14] 国家电网有限公司. 低压电力线宽带载波通信互联互通技术规范: Q/GDW 11612.2—2016 [S]. 2016.
State Grid Corporation of China. Technical specification for interconnection and interoperability of low-voltage power line broadband carrier communications: Q/GDW 11612.2-2016[S]. 2016.
- [15] IEEE Std 1901-2018, IEEE Standard for Medium Frequency (less than 12 MHz) Power Line Communications for Smart Grid Applications[S]. 2018.
- [16] 陈启冠, 张栋, 任龙霞, 等. 基于电能表自动识别技术的低压集中抄表机制研究及应用[J]. 电器与能效管理技术, 2017(4): 46-51, 70.
CHEN Q G, ZHANG D, REN L X, et al. Research and application of low voltage centralized meter reading mechanism based on meter automatic identification technology[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(4): 46-51, 70.
- [17] 李琮琮, 范学忠, 王清, 等. 基于用电信息采集系统的配电网台区识别[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 109-114.
LI C C, FAN X Z, WANG Q, et al. Station area recognition of distribution network based on electricity information acquisition system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 109-114.
- [18] 李亚, 樊汝森, 蒋伟, 等. 基于 BP 神经网络的智能台区识别方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(3): 25-30.
LI Y, FAN R S, JIANG W, et al. Research on the intelligent transformer area recognition method based on BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(3): 25-30.
- [19] 潘明明, 田世明, 吴博, 等. 基于智能电表数据的台区识别与窃电检测方法研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 80-84.
PAN M M, TIAN S M, WU B, et al. Research on users' transformer attribute identification and stealing electricity detection method based on smart meter data[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 80-84.
- [20] 徐晓东, 吕干云, 鲁涛, 等. 基于智能电表数据与模糊 C 均值算法

- 的台区识别[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2020, 18(4): 1-7.
- XU X D, LYU G Y, LU T, et al. Transformer area recognition based on intelligent meter data and fuzzy C-means algorithm[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2020, 18(4): 1-7.
- [21] 阿辽沙·叶, 顾君, 张小秋. 基于数据时空相关性的智能台区识别技术[J]. 现代电子技术, 2018, 41(4): 30-33.
- ALIAOSHA Y, GU J, ZHANG X Q. Intelligent transformer room recognition technology based on temporal and spatial data correlation[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(4): 30-33.
- [22] LUAN W P, PENG J, MARAS M, et al. Distribution network topology error correction using smart meter data analytics[C]//Proceedings of 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2013: 21-25.
- [23] LUAN W P, PENG J, MARAS M, et al. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1964-1971.
- [24] 张家安. 电力系统分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- ZHANG J A. Power system analysis [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.
- [25] SHELDON M. ROSS. 龚光鲁 译. 随机过程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

SHELDON M. ROSS. GONG G L Translated. Stochastic processes[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.

- [26] LIN S, COSTELLO D J. Error control coding[EB]. 2004.

[作者简介]



谢映海(1983-), 男, 博士, 珠海中慧微电子有限公司在站博士后, 主要研究方向为电力宽带载波通信技术。



张玉(1984-), 女, 博士, 北京城市学院副教授, 主要研究方向为数字宽带通信技术。