



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 119128583 B

(45) 授权公告日 2025. 04. 25

(21) 申请号 202411133441.9

G01R 19/00 (2006.01)

(22) 申请日 2024.08.19

G01R 21/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06F 18/23 (2023.01)

申请公布号 CN 119128583 A

G06F 123/02 (2023.01)

(43) 申请公布日 2024.12.13

(56) 对比文件

(73) 专利权人 天津大学

CN 115864643 A, 2023.03.28

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

US 2014233662 A1, 2014.08.21

(72) 发明人 栾文鹏 贾瑞瑶 刘博 徐达

审查员 罗秀英

(74) 专利代理机构 北京盛询知识产权代理有限公司 11901

专利代理师 相凡

(51) Int. Cl.

G06F 18/24 (2023.01)

H02J 3/00 (2006.01)

G01R 25/00 (2006.01)

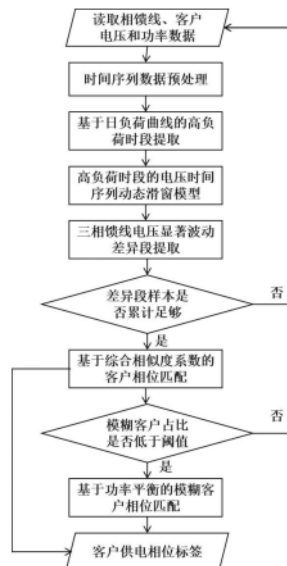
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

## (54) 发明名称

基于电压波动显著性分析的低压配电网客户相位辨识方法及系统

## (57) 摘要

本发明公开基于电压波动显著性分析的低压配电网客户相位辨识方法及系统,方法包括以下步骤:获得完整电压时间序列和完整功率时间序列;利用动态滑窗模型,提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段;基于显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列,进行客户供电相位匹配,若匹配成功,获得客户供电相位标签;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户;基于三相馈线完整功率时间序列以及所有客户的完整功率时间序列,采用功率守恒原理,为相位模糊客户进行供电相位匹配,获得客户供电相位标签。本发明能够实现客户供电相位的精确辨识。



1. 基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

S1: 获得三相馈线以及所有客户的完整电压时间序列和完整功率时间序列;

S2: 利用动态滑窗模型, 提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段; 步骤S2的方法为:

基于变压器总口的日负荷曲线, 获得高负荷时段;

在所述高负荷时段内, 预设一个窗长候选集并固定步长;

从三相馈线完整电压时间序列的第一个电压数据点开始, 分别计算窗长取所述窗长候选集中不同值时, 三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数;

将三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数的均值与预设相似度阈值进行比较, 获得最大窗长;

将所述最大窗长作为当前运行的实际窗口长度, 并将所述最大窗长的窗口时段记录为所述显著波动差异时段;

S3: 基于所述显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列, 进行客户供电相位匹配, 若匹配成功, 获得客户供电相位标签, 完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识; 否则, 将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户, 执行步骤S4; 步骤S3中进行客户供电相位匹配的方法为:

将所述显著波动差异段按照时间顺序重新拼接, 获得三相馈线相位检测序列;

计算所有客户完整电压时间序列与所述三相馈线相位检测序列的综合相似度系数, 并将所述综合相似度系数作为判定指标, 进行客户供电相位匹配;

当所述综合相似度系数满足预设条件时, 确定客户供电相位, 获得客户供电相位标签; 否则, 将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户;

计算所述综合相似度系数的方法为:

基于客户完整电压时间序列以及所述三相馈线相位检测序列各自的均值以及时间序列长度, 获得序列之间的皮尔逊相关系数;

基于序列之间的皮尔逊相关系数, 获得相关系数矩阵;

计算序列之间的平均欧式距离, 获得距离矩阵;

将所述距离矩阵进行归一化, 获得综合相似度矩阵;

基于所述综合相似度矩阵, 获得所有客户完整电压时间序列与所述三相馈线相位检测序列的综合相似度系数;

S4: 基于三相馈线完整功率时间序列以及所有客户的完整功率时间序列, 采用功率守恒原理, 为所述相位模糊客户进行供电相位匹配, 获得客户供电相位标签, 完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识。

2. 根据权利要求1所述的基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法, 其特征在于, 步骤S4中, 为所述相位模糊客户进行供电相位匹配的公式为:

$$\min \Delta p_i = \min \sum_{t=1}^n \left( p_{i,t} - \sum_{j=1}^u p_{j,t} - p_{0,t} \right) \quad (i = A, B, C)$$

$$s.t. \quad \left( p_{i,t} - \sum_{j=1}^m p_{j,t} - p_{0,t} \right) \geq 0 \quad (t = 1, 2, \dots, n)$$

其中,  $p_{i,t}$  表示  $i$  相馈线在  $t$  时刻的功率;  $u$  表示已确定供电相位为  $i$  相的客户数目,  $p_{j,t}$  表示已确定供电相位为  $i$  相的客户  $j$  在  $t$  时刻的功率;  $p_{0,t}$  表示相位模糊客户在  $t$  时刻的功率;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  代表三相馈线,  $\Delta p_i$  为相位模糊客户的供电相位。

3. 基于电压波动显著性分析的低压配电网客户相位辨识系统, 用于实现权利要求1-2任一项所述客户相位辨识方法, 其特征在于, 包括:

序列读取模块, 用于获得三相馈线以及所有客户的完整电压时间序列和完整功率时间序列;

显著波动差异段提取模块, 用于利用动态滑窗模型, 提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段;

第一相位匹配模块, 用于基于所述显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列, 进行客户供电相位匹配, 若匹配成功, 获得客户供电相位标签, 成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识; 否则, 将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户, 执行第二相位匹配模块;

第二相位匹配模块, 用于基于三相馈线完整功率时间序列以及所有客户的完整功率时间序列, 采用功率守恒原理, 为所述相位模糊客户进行供电相位匹配, 获得客户供电相位标签, 完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识。

4. 根据权利要求3所述的基于电压波动显著性分析的低压配电网客户相位辨识系统, 其特征在于, 所述显著波动差异段提取模块包括:

高负荷时段选取单元, 用于基于变压器总口的日负荷曲线, 获得高负荷时段;

窗长候选集建立单元, 用于在所述高负荷时段内, 预设一个窗长候选集并固定步长;

相关系数计算单元, 用于从三相馈线完整电压时间序列的第一个电压数据点开始, 分别计算窗长取所述窗长候选集中不同值时, 三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数;

最大窗长获取单元, 用于将三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数的均值与预设相似度阈值进行比较, 获得最大窗长;

显著波动差异时段获取单元, 用于将所述最大窗长作为当前运行的实际窗口长度, 并将所述最大窗长的窗口时段记录为所述显著波动差异时段。

5. 根据权利要求3所述的基于电压波动显著性分析的低压配电网客户相位辨识系统, 其特征在于, 所述第一相位匹配模块包括:

序列拼接单元, 用于将所述显著波动差异段按照时间顺序重新拼接, 获得三相馈线相位检测序列;

相位匹配单元, 用于计算所有客户完整电压时间序列与所述三相馈线相位检测序列的综合相似度系数, 并将所述综合相似度系数作为判定指标, 进行客户供电相位匹配;

相位模糊客户获取单元,用于当所述综合相似度系数满足预设条件时,确定客户供电相位,获得客户供电相位标签;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户。

## 基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于低压配电网相位辨识技术领域,具体涉及基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法及系统。

### 背景技术

[0002] 了解低压配电网络中客户的供电相位信息有利于快速故障定位、停电响应和进行资产管理。然而,由于客户负荷类型的差异,各种低压配电台区的相位辨识难度不一,传统通用的方法在特定台区的识别效果可能不佳。在大型商业或工业建筑中,供电密度高给数据量测带来更大的挑战,负荷具有多样性且功率差异较大,并且为保证供电稳定性绝大多数负荷为三相供电模式,台区三相不平衡程度非常低,增加了数据驱动方法的识别难度。因此研究基于三相不平衡程度较低的配电台区的相位识别技术,对于推动智能电网建设、增强电力系统稳定性、提高电力公司服务水平、提升客户体验都有着重大意义。

[0003] 目前,低压配网相位辨识的相关研究主要有两个方向,分别是通讯信号分析和电气量数据分析。使用通讯信号分析法进行相位辨识具有较高的精度,但选取通信信号的频率是非常考究的,并且容易受到噪声的干扰,在负荷变化较大的区域,辨识性能并不十分理想。此外,该类还需要安装额外的终端设备,这会导致投资成本高、运维压力大等问题。

[0004] 随着低压客户用电数据采集能力的不断提升,基于电气量数据的拓扑分析方法逐渐成为热门。目前主流的研究方法有:数学规划、聚类分析、深度学习等。数学规划法原理较为简单,但是计算复杂度较高,对数据样本数量和质量的要求较为严苛。基于聚类的拓扑辨识算法在台区规模较大时更加便捷,可以快速将客户分类并与相应的配电变压器、相位进行配对,缺点是算法的精度受特征和聚类阈值等参数影响较大。深度学习算法的实时性较差,因此在实际中应用受到一定的阻碍。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术的不足,本发明提供基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法及系统,实现客户供电相位的精确辨识。

[0006] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0007] 基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法,包括以下步骤:

[0008] S1:获得三相馈线以及所有客户的完整电压时间序列和完整功率时间序列;

[0009] S2:利用动态滑窗模型,提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段;

[0010] S3:基于所述显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列,进行客户供电相位匹配,若匹配成功,获得客户供电相位标签,完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户,执行步骤S4;

[0011] S4:基于三相馈线完整功率时间序列以及所有客户的完整功率时间序列,采用功率守恒原理,为所述相位模糊客户进行供电相位匹配,获得客户供电相位标签,完成基于电

压波动显著性分析的客户相位辨识。

[0012] 优选的,步骤S2中,利用动态滑窗模型,提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段的方法为:

[0013] 基于变压器总口的日负荷曲线,获得高负荷时段;

[0014] 在所述高负荷时段内,预设一个窗长候选集并固定步长;

[0015] 从三相馈线完整电压时间序列的第一个电压数据点开始,分别计算窗长取所述窗长候选集中不同值时,三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数;

[0016] 将三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数的均值与预设相似度阈值进行比较,获得最大窗长;

[0017] 将所述最大窗长最为当前运行的实际窗口长度,并将所述最大窗长的窗口时段记录为所述显著波动差异时段。

[0018] 优选的,步骤S3中,基于所述显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列,进行客户供电相位匹配的方法为:

[0019] 将所述显著波动差异段按照时间顺序重新拼接,获得三相馈线相位检测序列;

[0020] 计算所有客户完整电压时间序列与所述三相馈线相位检测序列的综合相似度系数,并将所述综合相似度系数作为判定指标,进行客户供电相位匹配;

[0021] 当所述综合相似度系数满足预设条件时,确定客户供电相位,获得客户供电相位标签;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户。

[0022] 优选的,计算所述综合相似度系数的方法为:

[0023] 基于客户完整电压时间序列以及所述三相馈线相位检测序列各自的均值以及时间序列长度,获得序列之间的皮尔逊相关系数;

[0024] 基于序列之间的皮尔逊相关系数,获得相关系数矩阵;

[0025] 计算序列之间的平均欧式距离,获得距离矩阵;

[0026] 将所述距离矩阵进行归一化,获得综合相似度矩阵;

[0027] 基于所述综合相似度矩阵,获得所有客户完整电压时间序列与所述三相馈线相位检测序列的综合相似度系数。

[0028] 优选的,步骤S4中,为所述相位模糊客户进行供电相位匹配的公式为:

$$\min \Delta p_i = \min \sum_{t=1}^n \left( p_{i,t} - \sum_{j=1}^u p_{j,t} - p_{0,t} \right) \quad (i = A, B, C)$$

[0029]

$$s.t. \quad \left( p_{i,t} - \sum_{j=1}^m p_{j,t} - p_{0,t} \right) \geq 0 \quad (t = 1, 2, \dots, n)$$

[0030] 其中, $p_{i,t}$ 表示i相馈线在t时刻的功率; $u$ 表示已确定供电相位为i相的客户数目, $p_{j,t}$ 表示已确定供电相位为i相的客户j在t时刻的功率; $p_{0,t}$ 表示相位模糊客户在t时刻的功率; $A、B、C$ 代表三相馈线, $\Delta p_i$ 为相位模糊客户的供电相位。

[0031] 本发明提供基于电压波动显著性分析的低压配电网客户相位辨识系统,用于实现所述客户相位辨识方法,包括:

[0032] 序列读取模块,用于获得三相馈线以及所有客户的完整电压时间序列和完整功率

时间序列；

[0033] 显著波动差异段提取模块,用于利用动态滑窗模型,提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段；

[0034] 第一相位匹配模块,用于基于所述显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列,进行客户供电相位匹配,若匹配成功,获得客户供电相位标签,成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识；否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户,执行第二相位匹配模块；

[0035] 第二相位匹配模块,用于基于三相馈线完整功率时间序列以及所有客户的完整功率时间序列,采用功率守恒原理,为所述相位模糊客户进行供电相位匹配,获得客户供电相位标签,完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识。

[0036] 优选的,所述显著波动差异段提取模块包括：

[0037] 高负荷时段选取单元,用于基于变压器总口的日负荷曲线,获得高负荷时段；

[0038] 窗长候选集建立单元,用于在所述高负荷时段内,预设一个窗长候选集并固定步长；

[0039] 相关系数计算单元,用于从三相馈线完整电压时间序列的第一个电压数据点开始,分别计算窗长取所述窗长候选集中不同值时,三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数；

[0040] 最大窗长获取单元,用于将三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数的均值与预设相似度阈值进行比较,获得最大窗长；

[0041] 显著波动差异时段获取单元,用于将所述最大窗长最为当前运行的实际窗口长度,并将所述最大窗长的窗口时段记录为所述显著波动差异时段。

[0042] 优选的,所述第一相位匹配模块包括：

[0043] 序列拼接单元,用于将所述显著波动差异段按照时间顺序重新拼接,获得三相馈线相位检测序列；

[0044] 相位匹配单元,用于计算所有客户完整电压时间序列与所述三相馈线相位检测序列的综合相似度系数,并将所述综合相似度系数作为判定指标,进行客户供电相位匹配；

[0045] 相位模糊客户获取单元,用于当所述综合相似度系数满足预设条件时,确定客户供电相位,获得客户供电相位标签；否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户。

[0046] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:提出基于动态滑窗模型和综合相似度系数的电压显著波动差异段提取方法,动态滑窗模型相比于定滑窗平衡了精度和效率,能够有效提取相间差异,所提的综合相似度系数在皮尔逊相关系数的基础上加入了对幅值的度量,具有良好的相间区分度,且有利于判断同相客户的邻居和上下游关系。

[0047] 利用功率平衡原理对少量“模糊”客户进行相位匹配,该类客户通常出现电压恶化或者量测质量差,相似度指标无法正确判定相位,利用功率验证进一步提高识别精度。

## 附图说明

[0048] 为了更清楚地说明本发明的技术方案,下面对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0049] 图1为本发明实施例基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法流程图；

[0050] 图2为本发明实施例电压时间序列滑窗模型示意图。

### 具体实施方式

[0051] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0052] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0053] 实施例一

[0054] 本发明提出了基于电压波动显著性分析的低压配电网络客户相位辨识方法,设计思路是:首先通过电网潮流分析客户功率波动对各节点电压幅值的影响关系,发现在台区高负荷时段各相电压之间变化趋势相对较大的特点,然后采用动态的滑动窗口模型辅助寻找三相馈线电压之间更加显著差异的电压段,并且对皮尔逊相关系数进行改进,形成综合曲线变化趋势和幅值大小的相似度系数作为主要判断指标,最后对于少量相似度指标识别模糊的客户节点,基于功率平衡理论进行相位匹配,实现客户供电相位的精确辨识。

[0055] 如图1所示,具体包括以下步骤:

[0056] S1:读取并预处理三相馈线以及所有客户的电压时间序列和功率时间序列,获得三相馈线以及所有客户的完整电压时间序列和完整功率时间序列;在本实施例中,以客户、三相馈线一段时间内收集到的电压和功率数据为输入,原始数据中存在噪声数据,需要检测异常噪声值并替换,电压时间序列中的异常值可以采用标准差检测法进行筛选,并用一段时间内的平均值或上一时刻值进行替换。对于缺失的数据采用相邻值填充,并删去连续数据缺失段,对所有节点的时间序列都进行缺失检测,选择有量测的公共时间段,最终生成包括三相馈线和所有客户的完整电压时间序列和完整功率时间序列。

[0057] 具体的,在本实施例中计算了客户*i*与A、B、C三相馈线之间的电压时间序列相似度系数以及三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数PCC (Pearson correlation coefficient)。具体计算过程,以计算客户电压时间序列之间的PCC、综合相似度系数为例:

[0058] 1) 综合相似度计算指标选取:两条时间序列之间的PCC表达式如下:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

[0060] 其中,X、Y分别表示两条时间序列曲线, $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别表示X和Y的均值,n表示时间序列长度。

[0061] 本发明提出了对PCC的改进方案,在n个客户电压曲线中两两之间计算PCC,形成一个相关系数矩阵W:

$$[0062] \quad W = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1m} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \cdots & \rho_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0063] 其中,  $m$  表示客户的数量,  $\rho_{ij}$  表示客户  $i$  与客户  $j$  电压时序曲线之间的PCC。

[0064] 然后通过式 (3) 计算两条曲线之间的平均欧式距离, 并形成式 (4) 所示的距离矩阵  $D$ :

$$l_{ij} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{k=1}^n |v_{i,k} - v_{j,k}|^2} \quad (3)$$

$$[0065] \quad D = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1m} \\ l_{21} & l_{22} & \cdots & l_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{m1} & l_{m2} & \cdots & l_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0066] 其中,  $n$  表示时间序列长度;  $v_{i,k}$ 、 $v_{j,k}$  分别表示客户  $i$  与客户  $j$  在时间断面  $k$  的电压值;  $l_{ij}$  表示客户  $i$  与客户  $j$  电压时序曲线之间的平均欧式距离。采用最小-最大归一化 (Min-max Normalization) 方法将距离矩阵  $D$  归化到  $[0, 1]$  范围内, 将两个矩阵合并, 形成综合相似度矩阵  $S$ :

$$[0067] \quad S = \alpha \cdot W + (1 - \alpha) \cdot (A_1 - \tilde{D}) \quad (5)$$

[0068] 其中,  $\tilde{D}$  表示归一化的平均欧式距离矩阵;  $A_1$  表示  $m$  阶的所有元素全为1的矩阵;  $S$  中的元素  $s_{ij}$  表示客户  $i$  与客户  $j$  之间的综合相似度系数;  $\alpha$  是权重系数, 其取值范围是  $[0, 1]$ 。

[0069] S2: 利用动态滑窗模型, 提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段; 本发明提出了一种动态选择窗长的滑窗模型, 用于选择各相电压波动差异较大的电压时间序列段。

[0070] 进一步的实施方式在于, 利用动态滑窗模型, 提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段的方法为:

[0071] 基于变压器总口的日负荷曲线, 获得高负荷时段;

[0072] 具体的, 变压器总口的日负荷曲线具有周期性和代表性, 因此本发明将高负荷时段定义为:

$$[0073] \quad p_{hl} \geq p_{\max} \cdot \sigma \quad (6)$$

$$[0074] \quad T_{\min} \geq k/f \quad (7)$$

[0075] 其中,  $p_{hl}$  表示符合高负荷条件时刻的变压器总口功率;  $p_{\max}$  表示总口的日负荷曲线最大值;  $\sigma$  为百分比系数;  $T_{\min}$  表示满足高负荷片段即连续高负荷时刻的最小持续时间;  $f$  表示数据采集频率;  $k$  为参数, 用于确定最短的高负荷片段需要满足的时间长度。

[0076] 在高负荷时段内, 预设一个窗长候选集  $w_{\text{set}} = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  并固定步长; 图2所示为电压序列滑窗示意图,  $v_i$  表示客户在时间断面  $i$  的电压值, 图中包括两个重要参数, 即窗

口长度(图中 $w_1$ 、 $w_2$ 所示)和步长(step)。

[0077] 从三相馈线完整电压时间序列的第一个电压数据点开始,分别计算窗长取窗长候选集 $w_{set}$ 中不同值时,三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数PCC,分别记为 $\rho_{AB}$ 、 $\rho_{BC}$ 、 $\rho_{AC}$ 。

[0078] 将三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数的均值 $\rho_{AVE}$ 与预设相似度阈值 $\rho_{thres}$ 进行比较,获得最大窗长;具体的,选取满足 $\rho_{AVE} \leq \rho_{thres}$ 的最大窗长作为当前运行的实际窗口长度。

[0079] 将最大窗长最为当前运行的实际窗口长度,并将最大窗长的窗口时段记录为显著波动差异时段。每次更新窗口之前重复上述步骤以确定窗长。

[0080] S3:基于显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列,进行客户供电相位匹配,若匹配成功,获得客户供电相位标签;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户;在本实施例中,当差异段样本累计满足预设要求时,进行客户相位匹配,否则重新读取时间序列。当相位模型客户占比低于预设阈值时,进行步骤S4基于功率平衡的模糊客户相位匹配,否则重新读取时间序列。

[0081] 进一步的实施方式在于,基于显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列,进行客户供电相位匹配的方法为:

[0082] 将显著波动差异段按照时间顺序重新拼接,获得三相馈线相位检测序列;

[0083] 计算所有客户完整电压时间序列与三相馈线相位检测序列的综合相似度系数,并将综合相似度系数作为判定指标,进行客户供电相位匹配;在本实施例中,对于所有客户和三相馈线,将总数据长度内所有的波动差异时段按时间顺序重新拼接,然后计算电压综合相似度矩阵(包括所有客户和三相馈线)。基于电压综合相似度矩阵,获得综合相似度系数。

[0084] 当综合相似度系数满足预设条件时,确定客户供电相位,获得客户供电相位标签;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户。具体的,根据客户 $i$ 与A、B、C三相馈线之间的相似度系数 $s_{iA}$ 、 $s_{iB}$ 、 $s_{iC}$ 大小关系判断客户的供电相位。当三者之间满足式(8)的关系时,认为区分度良好,系数最大值对应的相位即为该客户的供电相位,若某客户不满足该条件,将该客户暂定为相位“模糊”客户。

[0085]  $\max(s_{iA}, s_{iB}, s_{iC}) - \text{median}(s_{iA}, s_{iB}, s_{iC}) \geq 0.1$  (8)

[0086] 其中, $\max()$ 为取最大值函数, $\text{median}()$ 为取中位数函数。

[0087] 进一步的实施方式在于,计算综合相似度系数的方法为:

[0088] 基于客户完整电压时间序列以及三相馈线相位检测序列各自的均值以及时间序列长度,获得序列之间的皮尔逊相关系数;

[0089] 基于序列之间的皮尔逊相关系数,获得相关系数矩阵;

[0090] 计算序列之间的平均欧式距离,获得距离矩阵;

[0091] 将距离矩阵进行归一化,获得综合相似度矩阵;

[0092] 基于综合相似度矩阵,获得所有客户完整电压时间序列与三相馈线相位检测序列的综合相似度系数。

[0093] S4:基于三相馈线完整功率时间序列以及所有客户的完整功率时间序列,采用功率守恒原理,为相位模糊客户进行供电相位匹配,获得客户供电相位标签,完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识。

[0094] 对于辨识过程中可能出现的相位“模糊”客户,利用功率平衡原理对其相位进行匹配,即在配电网系统中,台区某相负荷的总功率等于该相所有客户用电功率与网损功率之和,而低压商业台区电压等级低、供电线路短,网损相对较小。

[0095] 进一步的实施方式在于,在相位“模糊”客户占台区所有客户比值低于5%时,可以通过功率差的形式对某个客户相位进行匹配。即:

$$\begin{aligned} \min \Delta p_i &= \min \sum_{t=1}^n \left( p_{i,t} - \sum_{j=1}^u p_{j,t} - p_{0,t} \right) \quad (i = A, B, C) \\ \text{s.t.} \quad &\left( p_{i,t} - \sum_{j=1}^m p_{j,t} - p_{0,t} \right) \geq 0 \quad (t = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (9)$$

[0097] 其中,  $p_{i,t}$  表示  $i$  相馈线在  $t$  时刻的功率;  $u$  表示已确定供电相位为  $i$  相的客户数目,  $p_{j,t}$  表示已确定供电相位为  $i$  相的客户  $j$  在  $t$  时刻的功率;  $p_{0,t}$  表示相位模糊客户在  $t$  时刻的功率;  $A, B, C$  代表三相馈线,  $\Delta p_i$  为相位模糊客户的供电相位。

[0098] 该客户的相位即为所计算的  $\Delta p_A, \Delta p_B, \Delta p_C$  中最小值所对应的相位。需要强调的是,在计算  $\Delta p_i$  时,需要保证在任意时刻  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, n$ ) 的上述功率差值都非负,否则客户就显然不会归属于这一相位。

[0099] 实施例二

[0100] 本发明还提供基于电压波动显著性分析的低压配电网客户相位辨识系统,用于实现客户相位辨识方法,包括:

[0101] 序列读取模块,用于获得三相馈线以及所有客户的完整电压时间序列和完整功率时间序列;

[0102] 显著波动差异段提取模块,用于利用动态滑窗模型,提取三相馈线完整电压时间序列的显著波动差异段;

[0103] 第一相位匹配模块,用于基于显著波动差异段以及所有客户的完整电压时间序列,进行客户供电相位匹配,若匹配成功,获得客户供电相位标签,完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户,执行第二相位匹配模块;

[0104] 第二相位匹配模块,用于基于三相馈线完整功率时间序列以及所有客户的完整功率时间序列,采用功率守恒原理,为相位模糊客户进行供电相位匹配,获得客户供电相位标签,完成基于电压波动显著性分析的客户相位辨识。

[0105] 进一步的实施方式在于,显著波动差异段提取模块包括:

[0106] 高负荷时段选取单元,用于基于变压器总口的日负荷曲线,获得高负荷时段;

[0107] 窗长候选集建立单元,用于在高负荷时段内,预设一个窗长候选集并固定步长;

[0108] 相关系数计算单元,用于从三相馈线完整电压时间序列的第一个电压数据点开始,分别计算窗长取窗长候选集中不同值时,三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数;

[0109] 最大窗长获取单元,用于将三相馈线首端电压窗口之间的皮尔逊相关系数的均值与预设相似度阈值进行比较,获得最大窗长;

[0110] 显著波动差异时段获取单元,用于将最大窗长最为当前运行的实际窗口长度,并将最大窗长的窗口时段记录为显著波动差异时段。

[0111] 进一步的实施方式在于,第一相位匹配模块包括:

[0112] 序列拼接单元,用于将显著波动差异段按照时间顺序重新拼接,获得三相馈线相位检测序列;

[0113] 相位匹配单元,用于计算所有客户完整电压时间序列与三相馈线相位检测序列的综合相似度系数,并将综合相似度系数作为判定指标,进行客户供电相位匹配;

[0114] 相位模糊客户获取单元,用于当综合相似度系数满足预设条件时,确定客户供电相位,获得客户供电相位标签;否则,将相位匹配失败的客户作为相位模糊客户。

[0115] 实施例三

[0116] 选取两个不同台区类型的典型低压配电台区数据集对所提方法进行了测试和评估。第一个数据集来自某市的一个主要商业变电站供电网络。它包括变压器及其相关供电负载的数据。该数据集中的所有负载均为三相负载,原始数据以每秒1个样本的高频率采集。第二个数据集来自“IEEE European Low Voltage Test Feeder”(下文中简记为Test Feeder),该数据集由电力系统分析、计算和经济学分会配电系统分析小组的测试馈线工作组(The Test Feeders Working Group of the Distribution System Analysis Subcommittee of the Power Systems Analysis, Computing, and Economics)于2015年提供。该数据集包含整个变电站区域内的共906个节点,其中55个节点代表负载客户,均为单相客户。此外,数据集还以每分钟1个样本的频率提供了客户的用电数据,以及所有线路的模型和阻抗参数的详细信息。通过OpenDSS软件进行时序潮流计算获取变压器和客户的电压数据。考虑到算法的通用性,测试时采用最常见的数据采集频率即每15分钟1个样本。

[0117] 本发明在综合相似度指标构建、高负荷时段判定、动态滑窗阶段中涉及到的关键参数及取值如表1(算法关键参数)所示。

[0118] 表1

|        | 步骤        | 参数             | 参数描述             | 取值         |
|--------|-----------|----------------|------------------|------------|
|        | 综合相似度系数构建 | $\alpha$       | $W$ 与 $D$ 所占比例关系 | 0.7        |
| [0119] | 高负荷时段判定   | $\sigma$       | 定义高负荷时段的功率大小     | 60%        |
|        |           | $k$            | 定义高负荷时段最小持续时间    | 10         |
|        | 动态滑窗      | $w_{set}$      | 可选窗长集合           | {4,6,8,10} |
|        |           | $\rho_{thres}$ | 显著差异片段的判定阈值      | 0.4        |

[0120] 评价指标方面,除了常用的分类准确率中的精度Precision之外,增加相间平均相关系数IT-PCC(Inter-phase Average Pearson Correlation Coefficient)、相间综合差异度ITV(Inter-phase Composite Variance)、相内综合相似度INS(Inner-phase Similarity)这几个度量,具体表示为:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (10)$$

$$IT-PCC = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{3} (\rho_{iA} + \rho_{iB} + \rho_{iC}) \quad (11)$$

[0121]

$$ITV = 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{1}{2a} \sum_{i \in U_A} (s_{iB} + s_{iC}) + \frac{1}{2b} \sum_{j \in U_B} (s_{jA} + s_{jC}) + \frac{1}{2c} \sum_{k \in U_C} (s_{kA} + s_{kB}) \right) \quad (12)$$

$$INS = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{a} \sum_{i \in U_A} s_{iA} + \frac{1}{b} \sum_{j \in U_B} s_{jB} + \frac{1}{c} \sum_{k \in U_C} s_{kC} \right) \quad (13)$$

[0122] 依以上实验配置进行训练以及测试,得到测试结果如下:表2(商业台区显著波动差异段上的综合相似度系数);表3(Test Feeder显著波动差异段上的综合相似度系数);表4(两个台区的相位辨识结果)。

[0123] 表2

| 表号   | A 相馈线   | B 相馈线   | C 相馈线   | 表号   | A 相馈线  | B 相馈线   | C 相馈线   |
|------|---------|---------|---------|------|--------|---------|---------|
| m1-A | 0.8095  | 0.3509  | 0.2140  | m3-A | 0.7657 | 0.4591  | 0.3053  |
| m1-B | 0.3627  | 0.9057  | -0.0213 | m3-B | 0.2101 | 0.8118  | 0.0029  |
| m1-C | -0.0711 | -0.1002 | 0.7134  | m3-C | 0.0116 | -0.0731 | 0.8558  |
| m2-A | 0.9272  | 0.3818  | 0.0831  | m4-A | 0.8175 | 0.4010  | 0.2000  |
| m2-B | 0.5924  | 0.8858  | -0.0445 | m4-B | 0.1941 | 0.8605  | -0.1081 |
| m2-C | 0.2846  | -0.2017 | 0.8577  | m4-C | 0.0203 | -0.0498 | 0.7578  |

[0125] 表3

| 表号 | A 相馈线  | B 相馈线  | C 相馈线  | 表号 | A 相馈线  | B 相馈线  | C 相馈线  |
|----|--------|--------|--------|----|--------|--------|--------|
| 1  | 0.9707 | 0.5369 | 0.2954 | 7  | 0.2523 | 0.8323 | 0.4839 |
| 2  | 0.9348 | 0.4567 | 0.2101 | 8  | 0.3877 | 0.9232 | 0.5294 |
| 3  | 0.9341 | 0.4518 | 0.1992 | 9  | 0.0714 | 0.1365 | 0.8263 |
| 4  | 0.9348 | 0.4544 | 0.2077 | 10 | 0.0668 | 0.1316 | 0.8243 |
| 5  | 0.2202 | 0.8004 | 0.4771 | 11 | 0.0412 | 0.0895 | 0.7943 |
| 6  | 0.2556 | 0.8344 | 0.4860 | 12 | 0.0335 | 0.0931 | 0.7948 |

[0127] 表4

| 台区          | 数据规模(天) | 差异段样本数 | ITV    | INS    | Precision |
|-------------|---------|--------|--------|--------|-----------|
| 商业台区        | 7       | 60     | 86.28% | 66.28% | 97.73%    |
| Test Feeder | 1       | 17     | 88.22% | 70.19% | 100.00%   |

[0129] 在三相客户为主的商业台区和单相客户为主的居民台区中的对比测试结果表明,两台区客户显著波动差异段上的与不同馈线之间的综合相似度系数有明显的差异,相间综合差异度均达到了86%以上,INS明显低于ITV,且准确率均达到97%以上,说明本发明所提方法在两种台区均适用。

[0130] 以上所述的实施例仅是对本发明优选方式进行的描述,并非对本发明的范围进行限定,在不脱离本发明设计精神的前提下,本领域普通技术人员对本发明的技术方案做出的各种变形和改进,均应落入本发明权利要求书确定的保护范围内。

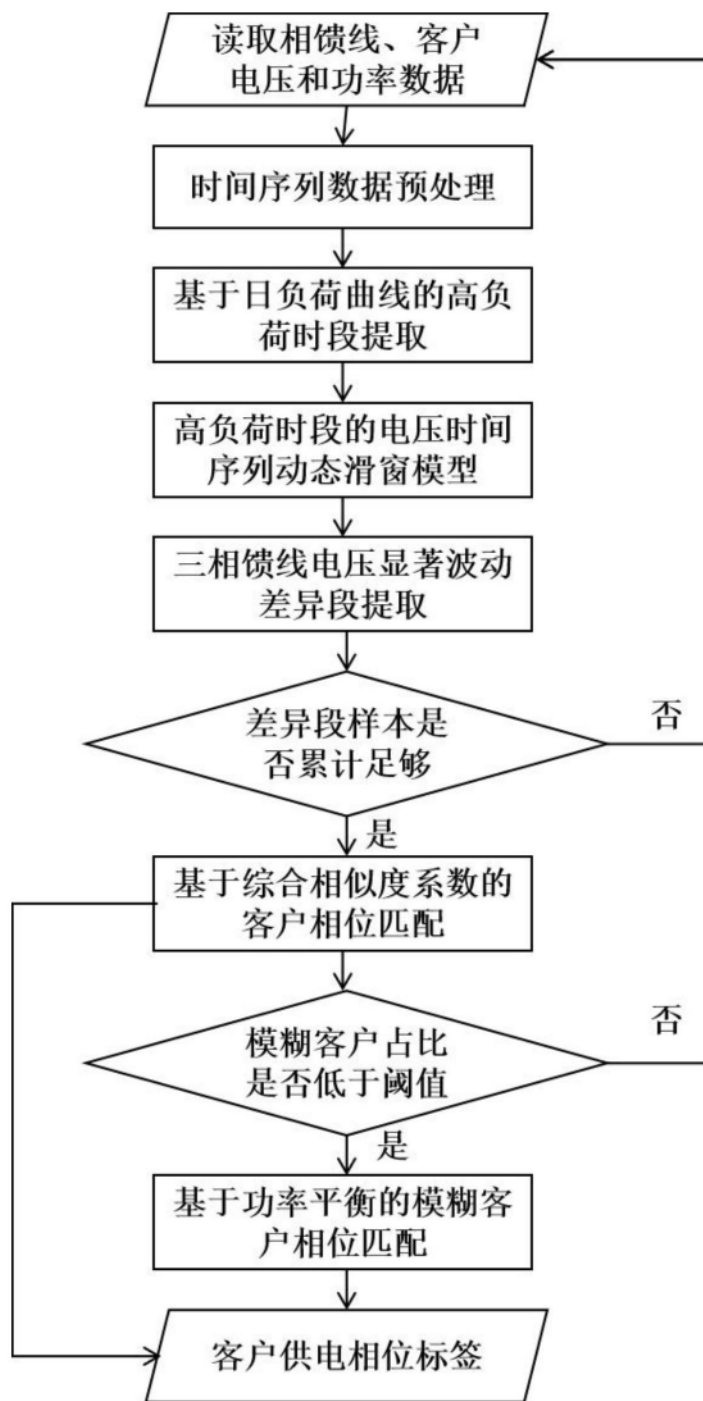


图1

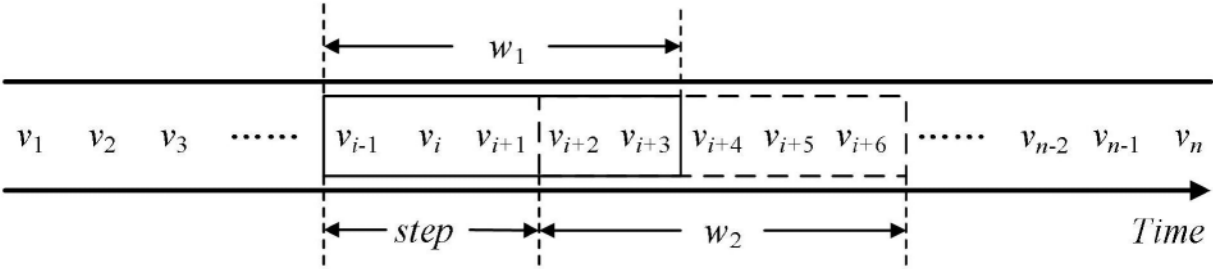


图2