

# 基于聚类分析的配台区拓扑识别方法

刘凯<sup>1</sup>, 李镇海<sup>2</sup>, 吕利<sup>2</sup>, 罗文<sup>2</sup>

(1. 北京电工技术学会, 北京 100193; 2. 江西仅能新能源微电网协同创新有限公司, 江西 吉安 343100)

**摘要:** 拓扑识别是配台区的技术热点之一, 拓扑关系是电网普遍需求。在不额外增加拓扑识别硬件的条件下, 利用台区同期电能数据进行拓扑识别, 是有别于专用拓扑装置的另一种方法。研究了基于基尔霍夫定律的智能装置父子关系的特征条件和数学组合算法, 并研究了基于聚类分析的拓扑识别算法, 实现了从台区总出线开关到用户电能表的拓扑识别过程。提出了智能装置拓扑关系的主要数据结构和拓扑数据表单。基于聚类分析的机器学习方法和组合优化算法的拓扑识别技术, 对于配台区的运行和维护具有实用价值, 对于配电数据孪生应用具有参考作用。

**关键词:** 配台区; 智能装置; 聚类组合; 拓扑识别

## Topology identification method for distribution areas based on clustering analysis

LIU Kai<sup>1</sup>, LI Zhenhai<sup>2</sup>, LÜ Li<sup>2</sup>, LUO Wen<sup>2</sup>

(1. Beijing Electrotechnical Society, Beijing 100193, China;

2. Jiangxi ENACS Renewable Energy and Micro Grid Innovations Co., Ltd., Ji'an 343100, China)

**Abstract:** Topology identification is one of the hot topics of distribution area technology. Topology relation is a universal demand of a power grid. Using the same period energy data of the distribution area to do topology identification is another method and is different from the special topology device and has no additional hardware of topology identification. The characteristic conditions and mathematical combination algorithm of the parent-child relationship of intelligent devices based on Kirchhoff's theorem are studied, and a topology identification algorithm based on cluster analysis is studied. Then the topology identification process from the main switch of a distribution area to the user's electricity meter is realized. The primary data structure and topological data form of intelligent device topology relation are presented. The topology identification technology based on machine learning methods such as cluster analysis and combinatorial optimization algorithm has practical value for the operation and maintenance of a distribution station, and can be used as a reference for the twinning application of distribution data.

This work is supported by the Science and Technology Project of Jiangxi Province (No. S2020ZPYFB1256).

**Key words:** distribution area; intelligent device; clustering & combination; topology identification

## 0 引言

低压配台区包括配电变压器、低压线路、开关、电能表等电气设备和装置。低压台区处于电网的末端, 遍及城市和乡村的边边角角, 就像人体的毛细血管一样遍布全身。

低压台区的特点是线路状况极其复杂, 往往是工程图纸等台账资料不全, 有的老旧小区线路更是一团乱麻, 出现故障的概率比较高。随着用户对

电能质量和供电服务水平要求的不断提高, 低压配网故障定位、应急抢修工作正在逐步开展, 配网台区拓扑识别成为客观需求<sup>[1]</sup>。

目前, 低压台区拓扑识别还处于应用初期, 笔者了解的拓扑识别方法, 有的采用特征电流波形注入法和特征负载接入法<sup>[2]</sup>, 有的采用载波方法加载特种波形, 通过终端感知的方法<sup>[3-5]</sup>, 有的采用在线路上安装电气测量装置, 通过测量计算线路阻抗进行拓扑识别<sup>[6]</sup>, 上述方法均需要安装拓扑特征标识装置。

本文所述的智能配台区<sup>[7]</sup>拓扑识别方法, 是

在不额外增加拓扑识别硬件装置的前提下, 尽量利用现有的智能电能表和智能开关, 通过电力线宽带载波(HPLC)通信<sup>[8-10]</sup>, 也可采用无线通信<sup>[11-12]</sup>, 采集智能电能表和智能开关等智能装置的通信地址、标识代码、相别及同期电能数据, 根据基尔霍夫定律, 采用数学组合算法, 搜索若干个子装置的同期电能之和与其父装置的同期电能大约相等的数值关系, 生成若干子装置集合。再利用机器学习的聚类算法, 确定唯一的父子装置拓扑关系。

本文所述的拓扑识别技术的进一步研究和开发, 应与具有电力系统建模及计算功能的云平台融合, 利用智能台区拓扑识别的结果, 再增补其他配电数据, 生成通用的台区 CIM 模型<sup>[13]</sup>; 还有望用于智能装置的故障识别和定位; 随着低压智能装置数量的增多, 智能装置采用人工离线输入通信地址的方式工作量大, 容易出错, 智能装置的在线自动拓扑编址也是一项具有实用价值的应<sup>[14]</sup>。

### 1 基于聚类分析的智能装置拓扑算法

配电台区的拓扑关系是这样的, 从配变低压侧开始, 依次为低压进线层级、低压出线及无功补偿层级、一级分支线路层级、二级分支线路层级、户表箱和户表层级, 纵向一般可分为 3 到 5 层级。智能电能表一般处于最末层级, 其他层级一般为智能开关。智能开关可为智能框架断路器、智能塑壳断路器或智能微型断路器。智能开关和智能电能表要具备时间同步功能、电能测量(计量)及数据整点冻结功能。

本文所述的智能装置, 是指智能开关和智能电能表。智能装置的拓扑匹配<sup>[15-18]</sup>, 是指在同一个配电台区的智能装置中, 为上级智能装置匹配经过电气连接的若干个下级智能装置。如图 1 所示, 节点 0 为上级智能装置, 通过线路  $L_1$ 、 $L_i$ 、 $L_j$ 、 $L_n$  分别连接下级智能装置节点 1、节点  $i$ 、节点  $j$ 、节点  $n$ 。节点 0 为父节点, 其余为子节点, 子节点又是其下级具有电气连接节点的父节点。

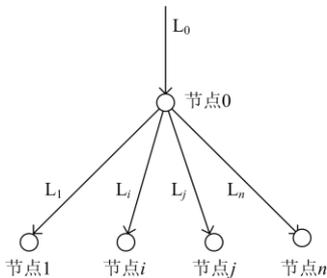


图 1 线路拓扑示意图

Fig. 1 Circuit topology diagram

#### 1.1 智能装置父子关系的特征条件

本文以智能装置的同期电能数据作为判断智能装置父子关系的数值条件。电能数据是智能装置容易计算的积分数据, 对时间同步精度没有严格要求。电流数据也可作为判断智能装置父子关系的数值条件, 但电流数据是实时数据, 对时间同步精度要求比较高, 实际运行中很难满足要求。

如图 1 所示,  $L_0$  是主电路,  $L_1$ 、 $L_i$ 、 $L_j$ 、 $L_n$  为  $L_0$  的分支电路。根据基尔霍夫定律<sup>[19]</sup>, 主电路与分支电路的电流数值关系为

$$I_0 = \sum_{i=1}^n I_i \quad (1)$$

忽略各个子节点的电压损失, 可导出

$$E_0 = \sum_{i=1}^n E_i \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为父节点 0 的同期电能;  $E_i$  为子节点  $i$  的同期电能。

考虑电能计量误差  $\delta E$  和电能损耗  $\Delta E$ ,  $n$  个子装置与 1 个父装置的电能关系为

$$E_0 - \delta E \leq \sum_{i=1}^n E_i \leq E_0 + \delta E + \Delta E \quad (3)$$

智能装置父子关系特征条件是: 如果 1 个装置的同期电能与其他  $n$  个装置的同期电能之和满足式(3)的数值条件, 更充分的是, 1 个装置对应的单相同期电能与其他  $n$  个装置的各单相同期电能之和满足式(3)的数值条件, 说明该装置与其他  $n$  个装置存在父子关系。

式(3)确定的父子关系理论上是唯一的。但是在实际应用中, 因为电能计量误差  $\delta E$  和电能损耗  $\Delta E$  取值比较困难, 不易确定特征区间  $[E_0 - \delta E, E_0 + \delta E + \Delta E]$ , 如果特征区间取值太小, 有可能漏掉子节点。为了不遗漏子节点, 需要适当扩大特征区间。试取特征区间为  $[(1-k)E_0, (1+k)E_0]$ , 则式(3)可表示为

$$(1-k)E_0 \leq \sum_{i=1}^n E_i \leq (1+k)E_0 \quad (4)$$

式中,  $k$  为特征区间宽度系数, 可以试取为 10%。因为一般的配电台区综合线损为 6%~10%, 所以,  $k$  可取为 10%, 也可以再大一点。

按照式(4)的特征条件, 1 个父装置可能会搜索到多个子装置集合, 需要按照聚类算法来确定唯一的子装置集合。

## 1.2 智能装置父子关系遍历组合算法

智能装置父子关系组合匹配, 就是在子装置的同期电能集合中, 搜索同期电能之和符合式(4)的子集。

设子装置同期电能数组为

$$\text{float } E[n] = \{E[0], E[1], \dots, E[n-1]\} \quad (5)$$

假设在  $n$  个子装置的数组中, 不重复地从中选取  $m$  个子装置, 则子装置的组合方案数  $M$  的计算公式为<sup>[20]</sup>

$$M = C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (6)$$

假设在  $n$  个子装置的集合中, 不重复地从中选取 1 到  $m$  个子装置, 则子装置的组合方案数  $M$  的计算公式为

$$M = \sum_{i=1}^m C_n^i = \sum_{i=1}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (7)$$

同期电能数组(5)元素的遍历组合方案, 就是采用“树”的组合算法<sup>[21]</sup>。现以 3 个元素为例, 说明遍历组合方法。图 2 是 3 个元素的遍历组合示意图, 组合方案共有 7 种。

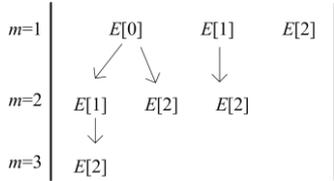


图 2 数组遍历组合示意图

Fig. 2 Array traversal composite schematic

同期电能数组的遍历组合过程如下:

参照图 2, 采用宽度优先的搜索策略<sup>[22]</sup>, 横向搜索按照数组元素序号从小到大的次序, 纵向搜索按照数组元素数量  $m$  从 1 到  $n$  的次序, 形成数组元素序号不重复的组合序列, 为每组序列对应的同期电能求和。求和结果采用式(4)与父节点的同期电能  $E_0$  进行比较, 符合条件的进行存储。直至完成式(7)计算的  $M$  种方案。由于计算过程比较冗长, 此处不作赘述。

符合式(4)的子装置组合方案的数据结构<sup>[23]</sup>定义如下:

```

struct Combin {
    float sum;           // 同期电能组合求和结果。
    int mun[];          // 同期电能数组元素序号,
}                       // 取值为自然数。
  
```

子装置组合表如下:

$$\text{Combin.group}[C] \quad (8)$$

其中,  $C$  为子装置组合的数量, 取自然数。

数组组合的数学问题是当数组元素比较多时, 会产生组合爆炸问题, 需要采用组合优化求解算法<sup>[24]</sup>, 因是纯数学问题, 此处不作讨论。

## 1.3 智能装置父子关系的聚类分析

按照机器学习的聚类分析原理<sup>[25-26]</sup>, 采用“距离”作为样本分类的判据, 在智能装置的父子关系中, 父子距离可以其同期电能的相对误差作为判据, 计算公式为

$$\delta = |E_0 - \text{sum}| / E_0 \quad (9)$$

式中:  $\delta$  为父子装置同期电能的相对误差;  $E_0$  为父装置的同期电能;  $\text{sum}$  为子装置的同期电能之和。

确定父子关系的判据是:

- 1) 父子装置同期电能的相对误差最小;
- 2) 子装置组合的装置数量最少。

选取相对误差最小的和装置数量最少的一组子装置组合, 作为父子装置拓扑关系。

假设选定的子装置组合为  $\text{Combin.group}[i]$ , 则  $\text{Combin.group}[i].\text{sum}$  存储了子装置组合的同期电能之和数据,  $\text{Combin.group}[i].\text{mun}[]$  存储了子装置组合的元素序号。根据子装置组合的元素序号, 可以检索得到子装置的通信地址等数据。

## 2 智能装置的信息采集和简单分类

同期电能数据来自智能电能表的电能计量整点冻结数据和智能开关的电能测量整点冻结数据。此类数据可以通过智能配电终端(融合终端)、集中器或其他方式进行采集。

### 2.1 智能装置的数据结构

电能表及智能开关等智能装置的数据结构定义如下:

```

struct Terminal {
    int Add_Code;           //通信地址。
    char ID_Code[22];      //资产标识代码。
    float Ea;               //A 相同期有功电能。
    float Eb;               //B 相同期有功电能。
    float Ec;               //C 相同期有功电能。
    float E;                //三相同期有功电能。
}
  
```

智能装置数据表定义如下:

$$\text{struct Terminal Total\_Datd}[\text{num}]; \quad (10)$$

式中,  $\text{num}$  表示读取到的智能装置的数量, 包含进线开关、出线开关和电能表。

### 2.2 智能装置的简单分类

根据《电能计量器具条码》(Q/GDW 1205—2013)规定<sup>[27]</sup>, 电能计量器具的通用标识代码由 22 位数

字组成，左起第 1 至第 5 位为使用单位代码，第 6 和第 7 位为资产类型代码，第 8 至第 21 位为 14 位产品序列号，第 22 位为校验码。资产类型代码 01 表示电能表。智能开关等其他装置，一般没有资产类型代码，可以根据装置的相别信息判断资产类型。如具有三相电流的装置一般是三相开关，具有单相电压单相电流的装置可能是单相开关。

将资产类型代码为 01 的归为电能表类，电能表数据索引表定义为

```
struct Terminal *Mater_Data;      (11)
```

### 2.3 智能开关排序

从智能装置数据表(10)中，选取除电能表数据索引表(11)以外的智能装置，组成新的智能开关序列，按照同期电能从大到小的顺序，将智能开关序列排序，生成智能开关数据索引表：

```
struct Terminal *Switch_Data;    (12)
```

电能表数据索引表(11)和智能开关数据索引表(12)采用指针方式分别存储智能装置数据表(10)对应数据的首地址而不是重复存储数据，可以节省存储空间。

## 3 智能装置拓扑识别

父子装置的数据结构定义为：

```
struct Device {
    int Parent_Add;           // 父装置的通信地址。
    int Self_Add;            // 本装置的通信地址。
    int Son_Add[];           // 子装置的通信地址。
}
```

智能装置拓扑表定义如下：

```
struct Device Topo[line][column]; (13)
```

式中：*line* 表示装置所在的行或层，取自然数；*column* 表示装置所在的列，取自然数。

本结构定义了一个智能装置自身的通信地址，还定义了该装置父节点的通信地址和所有子节点的通信地址。

### 3.1 出线开关的拓扑识别

《国家电网公司 380 V/220 V 配电工程典型设计》<sup>[28]</sup>中规定，1 个进线开关对应的出线开关数量可为 1、2、3、4、6，最多为 6 个。考虑同期电能的数值误差，需要扩大出线开关的搜索范围，采用 0.618 黄金分割点<sup>[29-30]</sup>扩大搜索范围。算法为：设出线开关数量为 *m*，出线开关搜索范围为 *n*(*n* 取自然数)：

$$n = m + 0.618m \quad (14)$$

现以出线开关数量为 6 进行计算，出线开关搜索范围取 10。所以，出线开关的全组合方案有  $M = 2^{10} - 1 = 1023$  种。

进线开关与出线开关父子关系的拓扑识别过程如下：

1) 在智能开关数据索引表(12)中，第 0 号数据指向的，即 Terminal.Switch\_Data[0]就是智能装置数据表(10)中进线开关数据记录的首地址，取其通信地址，赋予智能装置拓扑表(13)的结构成员 Self\_Add，取其同期电能数据，赋予  $E_0$ 。因为进线开关无父节点，所以其父节点的通信地址可以存储台区编号。

2) 从智能开关数据索引表(12)中，取第 1 号数据至第 *n* 号数据指向的存储单元中的同期电能数据，组成子装置同期电能数组(5)。

3) 利用智能装置拓扑算法进行父子节点的组合匹配，确定唯一子节点组合：

```
Combin.group[i];
```

4) 按照 Combin.group[i].mun[]的序号，从智能开关数据索引表(12)中取得对应的子装置的通信地址，赋予智能装置拓扑表(13)的结构成员 Son\_Add[]。

5) 从智能开关数据索引表(12)删除 Combin.group[i].mun[]序号的子装置。按照同期电能从大到小重新对智能开关数据索引表(12)排序。

通过上述过程识别的进线开关和出线开关拓扑关系可表示为

```
Device.Topo [0][0];
```

### 3.2 分支开关的拓扑识别

分支开关一般有一级分支、二级分支等多级分支，每一级分支开关的同期电能之和应该相近，即与低压总进线开关的同期电能数据相近，所以，从智能开关数据索引表(12)中从大到小取 *m* 个开关，使其同期电能数据之和大于或等于低压总进线开关的同期电能数据。由于同期电能存在误差，应该适当扩大开关的数量，还是采用 0.618 黄金分割点扩大搜索范围，即采用式(14)计算。

现以识别 1#出线开关的子装置为例，说明分支开关的识别过程。

1) 从父节点 Device.Topo [0][0]中取得 1#出线开关的通信地址，赋值如下：

```
Device.Topo [1][0].Self.Add = Device.Topo [0][0].Son_Add[0];
```

从父节点 Device.Topo [0][0]中取得出线开关的通信地址，赋值如下：

```
Device.Topo [1][0].Parent_Add = Device.Topo [0][0].Self_Add;
```

2) 从智能装置数据表(10)中，搜索通信地址为 Device.Topo[1][0].Self\_Add 的智能装置，取其同期电能数据，赋值于  $E_0$ 。从智能开关数据索引表(12)中，抽取前 *n* 个子装置的同期电能数据，生成子装

置同期电能数组(5)。

3) 利用智能装置拓扑算法进行父子节点的组合匹配, 确定唯一子节点组合:

Combin.group[i];

4) 按照 Combin.group[i].mun[]的序号, 从智能开关数据索引表(12)中取得对应的子装置的通信地址, 赋予智能装置拓扑表(13)的结构成员 Son\_Add[]。

5) 从智能开关数据索引表(12)删除 Combin.group[i].mun[]的序号的子装置, 按照同期电能从大到小重新对智能开关数据索引表(12)排序。

至此, 1#出线开关的子装置匹配完毕。拓扑关系表示为

Device.Topo [1][0]

同理, 可以识别剩余装置的拓扑关系, 直到智能开关数据索引表(12)清空为止。

接下来要识别末端开关与电能表的拓扑关系。

## 4 电能表的拓扑识别

一般情况下, 电能表处于拓扑连接的末端, 1只智能开关与  $N$  只电能表构成父子拓扑关系。

### 4.1 电能表分组

从电力营销部门获取电能表台账信息, 将同一个单元或同一个电表箱的户表分在同一组, 并确定本组的进线开关。一般地, 同一住宅单元户表的进线开关安装在一楼的配电箱内, 同一个电表箱内的进线开关安装在箱体上侧。

电能表分组信息拓扑结构表示如下:

```
struct Mater {
    int Switch_Add;           //电表箱(单元)进线
                             //开关的通信地址。
    int Mater_Add[];        //电能表的通信地址。
}
```

电能表拓扑数据表定义如下:

struct Mater Topo[num]; (15)

式中, num 表示电能表分组序号。

电能表的拓扑关系也可采用基于聚类的智能装置拓扑算法进行识别, 但要注意上文所说的组合爆炸问题。

为了方便叙述, 下文将电能表分组称为电表箱或户表箱。

### 4.2 户表-电表箱(单元)拓扑校验

由于电能表台账信息可能会出错, 所以有必要进行电表箱拓扑校验。

取电表箱进线开关的同期电能为  $E_0$ , 户表同期电能之和为  $\sum_{i=1}^n E_i$ 。

根据式(4),  $k$  可取 2%, 因为电能表的精度等级一般为 1 级。如果满足式(4), 则确认户表-电表箱(单元)拓扑关系成立。

### 4.3 户-变拓扑校验

在低压配电实际运行中, 曾出现个别户表接在另一台配变的现象, 该现象为“户-变”关系错误, 所以, 有必要进行“户-变”关系校验。

取进线开关的同期电能为  $E_0$ , 所有户表同期电能之和为  $\sum_{i=1}^n E_i$ 。

根据式(4)进行校验, 如果满足式(4), 则认为“户-变”关系成立。

### 4.4 电表箱与其父装置的拓扑连接

以电能表拓扑数据表(15)开关通信地址与智能装置拓扑表(13)子装置通信地址相同为搜索条件, 将电能表拓扑数据表(15)赋值于智能装置拓扑表(13), 方法如下所示:

```
Device.Topo [i][x].Parent_Add =
Device.Topo [i-1][x].Self_Add;
Device.Topo [i][x].Self_Add =
Device.Topo [i-1][x].Son_Add[j];
Device.Topo [i][x].Son_Add[] =
Mater.Topo [j].Son_Add[];
```

## 5 结论

通过智能配电(融合)终端 TTU 和智能开关、智能电能表等智能装置, 利用配电监控云平台<sup>[31]</sup>的计算能力和电能数据及用户台账信息, 采用基于聚类分析的拓扑识别方法, 能够充分利用配电数据资源, 具有硬件投资少、易于工程化和实用化的优点。

为了提高台区拓扑识别的准确性, 及时识别拓扑结构的变更情况, 台区拓扑识别需要多次进行。随着台区智能装置的更替和普及, 还要研究更精确更快捷的拓扑匹配算法。

随着智能台区边缘计算<sup>[32]</sup>能力的提高, 也可采用在台区边缘计算装置上安装台区拓扑识别 APP 的方式, 在台区实现拓扑识别, 在配电监控云平台上实现拓扑校验和拓扑信息补充完善的方法。

配电拓扑识别技术要与电力系统建模及计算分析技术紧密结合。互相提供数据, 互相验证校验, 提高拓扑识别结果的准确性。拓扑识别结果的进一步扩展应用是生成通用化和标准化的台区低压配电 CIM 模型。目前, 电网企业经营的 10 kV 及以下的电网已经应用 CIM 模型文件, 低压配电、新型增量配电网、微网还未应用 CIM 模型。在低压配电、增

量配电网、微网中建立 CIM 建模,为电网运行维护、配电地理信息展现、潮流计算、线损计算等应用提供标准化的交换文件是很有必要的。

基于配电监控云平台的拓扑识别技术,还要研究开发机器学习算法,提高拓扑识别的智能化程度。也可采用人工智能方法,利用电网系统丰富的数据资源,在更大范围内进行拓扑识别的应用研究。

### 参考文献

- [1] 张勇军, 刘斯亮, 江金群, 等. 低压智能配电网技术研究综述[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 1-12.  
ZHANG Yongjun, LIU Siliang, JIANG Jinqun, et al. Research review on low-voltage intelligent distribution network technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 1-12.
- [2] 刘洋. 营配信息集成背景下的低压拓扑试验判定方法和低压单线图需求分析[J]. 科技创新与应用, 2014(29): 184-185.  
LIU Yang. Low voltage topology test determination method and low voltage single line diagram demand analysis under the background of distribution information integration[J]. Technology Innovation and Application, 2014(29): 184-185.
- [3] 卢虹宇, 蔡月明, 刘明祥, 等. 低压配电台区拓扑辨识及校核方法[J]. 电气自动化, 2020, 42(3): 95-98.  
LU Hongyu, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Topology identification and check method for low-voltage distribution areas[J]. Electrical Automation, 2020, 42(3): 95-98.
- [4] 方鹏, 徐世泽, 沈春林, 等. 低压电网拓扑实时生成平台产品化研究[J]. 科技创新与应用, 2019(36): 63-65.  
FANG Peng, XU Shize, SHEN Chunlin, et al. Research on productization of real-time topology generation platform for low voltage power grid[J]. Technology Innovation and Application, 2019(36): 63-65.
- [5] 李明维, 张传远, 马晓昆, 等. 低压配电台区网络拓扑和相别自动辨识技术研究[J]. 电气时代, 2018(10): 62-63.  
LI Mingwei, ZHANG Chuanyuan, MA Xiaokun, et al. Research on network topology and automatic identification of phase in low voltage distribution area[J]. Electric Age, 2018(10): 62-63.
- [6] 巴祎. 一种台区低压配电网拓扑及线路阻抗识别方法: 中国, CN201910857146.0[P]. 2020-01-03.  
BA Yi. A method for topology and line impedance identification of low-voltage grid in distribution area: China, CN201910857146.0[P]. 2020-01-03.
- [7] 万仁刚, 杨镇宁, 周行, 等. 低压配电网现况分析及智能配变终端发展方向探究[J]. 电气工程, 2018, 6(4): 340-344.  
WAN Rengang, YANG Zhenning, ZHOU Hang, et al. Analysis of low voltage distribution network and the development direction of intelligent distribution transformer terminal[J]. Journal of Electrical Engineering, 2018, 6(4): 340-344.
- [8] 王鸿玺, 唐如意, 吴一敌, 等. 基于 HPLC 的智能抄表技术在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 92-97.  
WANG Hongxi, TANG Ruyi, WU Yidi, et al. Research and application of smart meter reading technology based on HPLC in customer side universal power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 92-97.
- [9] 妙红英, 高寅, 王松, 等. 宽带电力线载波通信技术在用电信息采集系统中的应用[J]. 华北电力技术, 2015(4): 16-19.  
MIAO Hongying, GAO Yin, WANG Song, et al. Broadband power line carrier communication technology and its applications in electric energy data acquisition system[J]. North China Electric Power, 2015(4): 16-19.
- [10] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-69.  
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-69.
- [11] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 2-6.  
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 2-6.
- [12] 王朝明, 马春生, 吉彬. 一种低压配电台区拓扑自动识别系统: 中国, CN202010030313.7[P]. 2020-01-13.  
WANG Chaoming, MA Chunsheng, JI Bin. A topology automatic identification system for low voltage distribution area: China, CN202010030313.7[P]. 2020-01-13.
- [13] 电力系统数据标记语言—E 语言规范: Q/GDW 215—2008[S].  
Power system data markup language—E language specification: Q/GDW 215—2008[S].
- [14] 谈竹奎, 程乐峰, 史守圆, 等. 能源互联网接入设备关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 140-150.  
TAN Zhukui, CHENG Lefeng, SHI Shouyuan, et al. Discussion on key technologies of energy internet access equipment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 140-150.
- [15] 杨志淳, 沈煜, 杨帆, 等. 基于数据关联分析的低压配电网拓扑识别方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 5-11, 35.  
YANG Zhichun, SHEN Yu, YANG Fan, et al. Topology identification method of low voltage distribution network based on data association analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 5-11, 35.

- [16] 谷海彤, 张远亮, 卢翔智, 等. 基于深度学习的户变拓扑关系的识别方法研究[J]. 信息系统工程, 2020(3): 150-151.  
GU Haitong, ZHANG Yuanliang, LU Xiangzhi, et al. Research on the identification method of topological relationship between household electricity meter and distribution transformer based on deep learning[J]. China CIO News, 2020(3): 150-151.
- [17] 谢小瑜, 周俊煌, 张勇军. 深度学习在泛在电力物联网中的应用与挑战[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 77-84.  
XIE Xiaoyu, ZHOU Junhuang, ZHANG Yongjun. Application and challenges of deep learning in ubiquitous electric internet of things[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 77-84.
- [18] 黄国政, 黄孟哲, 邓瑞麒, 等. 配网低压拓扑图自动成图技术探讨[J]. 机电信息, 2020(3): 17-18.  
HUANG Guozheng, HUANG Mengzhe, DENG Ruiqi, et al. Discussion on automatic drawing technology of low voltage topology of distribution grid[J]. Mechanical and Electrical Information, 2020(3): 17-18.
- [19] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] 周鹤良. 电气工程师手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [21] 王爱法, 杨梅梅, 福春霞. 二叉树及其遍历算法的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(11): 195-198.  
WANG Aifa, YANG Meimei, FU Chunxia. Application of binary tree and its traversal algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(11): 195-198.
- [22] 陈素琼. 搜索算法综述[J]. 信息与电脑, 2016(2): 87-88.  
CHEN Suqiong. Overview of search algorithms[J]. China Computer & Communication, 2016(2): 87-88.
- [23] 谭浩强. C 语言程序设计[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [24] 叶雄, 杨皓栋. 基于二叉决策图的状态组合爆炸问题并行求解方法[J]. 电子技术与软件工程, 2018(17): 184-186.  
YE Xiong, YANG Haodong. Parallel solution method for state combination explosion problem based on binary decision diagram[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018(17): 184-186.
- [25] 章永来, 周耀鉴. 聚类算法综述[J]. 计算机应用, 2019, 39(7): 1869-1882.  
ZHANG Yonglai, ZHOU Yaojian. Overview of clustering algorithms[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(7): 1869-1882.
- [26] 张艺涵, 徐菁, 李秋燕, 等. 基于密度峰值聚类的电动汽车充电站选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 132-138.  
ZHANG Yihan, XU Jing, LI Qiuyan, et al. An electric vehicle charging station siting and sizing method based on a density peaks clustering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 132-138.
- [27] 电能计量器具条码: Q/GDW 1205—2013[S].  
Barcode for power metering instruments: Q/GDW 1205—2013[S].
- [28] 帅军庆. 国家电网公司 380/220 V 配电网工程典型设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [29] 程涛, 陈君德, 萧嘉荣, 等. 基于 0.618 法优化的电网暂稳极限切除时间实用计算方法[J]. 电工技术, 2020(1): 44-46.  
CHENG Tao, CHEN Junde, XIAO Jiarong, et al. A practical calculation method of power grid transient stability limit cut time optimized by 0.618 method[J]. Electric Engineering, 2020(1): 44-46.
- [30] 董媛媛, 谢承蓉. 一种改进的 0.618 法[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2014(8): 4-6.  
DONG Yuanyuan, XIE Chengrong. An improved 0.618 method[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014(8): 4-6.
- [31] 潘旭辉, 陈成, 王泽睿, 等. 基于 SCADA 技术的低压配网控制系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 183-186.  
PAN Xuhui, CHEN Cheng, WANG Zerui, et al. Research of low-voltage distribution network control system based on SCADA technology[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 183-186.
- [32] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 58-65.  
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 58-65.

收稿日期: 2021-04-23; 修回日期: 2021-06-29

作者简介:

刘凯(1962—), 男, 通信作者, 硕士, 高工, 研究方向为配用电自动化系统; E-mail: 41400546@qq.com

李镇海(1978—), 男, 学士, 研究方向为配网自动化;

吕利(1976—), 男, 硕士, 研究方向为 AI 算法及软件设计。

(编辑 魏小丽)